



GUIA DE INSPEÇÃO

INSPEÇÃO DE CALDEIRAS

Copyright © 2020 Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP)

Todos os direitos reservados ao Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP)

A reprodução não autorizada desta publicação, por qualquer meio, seja total ou parcial, constitui violação da Lei nº 9610/98.

Dados internacionais de Catologação na Publicação (CIP)

Elaborada pela biblioteca do Centro de Informação e Documentação
Hélio Beltrão - IBP

I59i Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás

Inspeção de caldeiras [recurso eletrônico] / Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás; coordenado por Luiz Antônio Moschini de Souza. - 3. ed. - Rio de Janeiro: IBP, 2020.

72 p.: il. color. - (Guias de inspeção, 5)

Formato: e-book em PDF.

Modo de acesso: www.ibp.org.br/biblioteca

ISBN 978-65-88039-01-4

1. Caldeiras. 2. Equipamentos Industriais - Inspeção. 3. Indústria Petrolífera. I. Moschini, Luiz Antônio. II. Título

CDD 621.18

www.ibp.org.br



IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás

Avenida Almirante Barroso, 52 - 21º e 26º andares -
Centro

Rio de Janeiro-RJ - CEP: 20031-918

Tel.: (+55 21) 2112-9000

APRESENTAÇÃO

Este Guia foi produzido pelo Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), com objetivo de apresentar subsídios básicos para implementação de **Planos de Inspeção de Caldeiras**.

Buscou-se incluir a experiência e as melhores práticas, trazidas por renomados profissionais que atuam nesta área de conhecimento, que foram organizadas, analisadas e formatadas para apresentação pelo engenheiro Luiz Antônio Moschini de Souza (Coordenador Técnico deste Guia).

Este guia se aplica a caldeiras a vapor d'água, localizadas em refinarias, petroquímicas, terminais para distribuição, plantas de processamento de gás e correlatas, incluindo aquelas sob o escopo da Norma Regulamentadora 13 (NR-13), regulamentação de segurança e saúde do Governo Federal.

O público-alvo deste guia são estudantes de graduação e pós-graduação, técnicos, engenheiros e pesquisadores que atuam ou pretendem atuar em Inspeção de Equipamentos.

Lisandro Gaertner

Gerente de Comissões e Gestão do Conhecimento - IBP

Roberto Odilon Horta

Gerente de Certificação - IBP

AGRADECIMENTOS

O IBP agradece a todos os que contribuíram para a elaboração deste Guia, assim como às empresas que permitiram que suas melhores práticas fossem condensadas e apresentadas nesta obra.

Não podemos deixar de destacar o empenho e dedicação dos profissionais abaixo, pertencentes à Subcomissão Regional de Inspeção de Equipamentos do Rio Grande do Sul (GRINSP-RS) e à Comissão de Inspeção de Equipamentos (ComInsp) do IBP, que voluntariamente contribuíram para elaboração deste guia com textos, experiências e boas práticas:

SUBCOMISSÃO DE INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS DO IBP (GRINSP-RS)

(em ordem alfabética)

- Jorge Faria de Oliveira
- Luis Carlos Greggianin
- Luis Felipe
- Luis Henrique Nunes de Freitas
- Luis Roberto de Souza
- Marco Aurélio Ritter
- Milton Mentz
- Elton Stein

COMISSÃO DE INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS DO IBP (COMINSP)

(em ordem alfabética)

- Aldo Cordeiro Dutra
- Amilcar Andrade Sales
- Antonio Luiz de Melo Vieira Leite
- Arnaldo Lima Fagundes
- Carlos Bruno Eckstein
- Claudio Soligo Camerini

- Deyson Marcelo Rothen
- Guilherme Victor Peixoto Donato
- Helder de Souza Werneck
- Heleno Ribeiro Simões
- Heloisa Cunha Furtado
- João Roberto Silva Picanço
- Joaquim Smiderle Corte
- Jorge dos Santos Pereira Filho
- Jose Eduardo de Almeida Maneschky
- José Luiz de França Freire
- Luis Antônio Moschini de Souza
- Luis Carlos Greggianin
- Marcelo Aparecido da Silva
- Marco Aurélio Oliveira Lima
- Mario Pezzi Filho
- Pavel Rodrigues Bernardi
- Pedro Feres Filho
- Pedro Vizilde Souza da Silva
- Ricardo Barbosa Caldeira
- Ricardo de Oliveira Carneval
- Ricardo Pereira Guimarães
- Roberto Odilon Horta
- Severino Albani Junior
- Teófilo Antônio de Sousa
- Tito Luiz da Silveira
- Waldomiro Lima Pereira

COORDENAÇÃO E REVISÃO TÉCNICA

- Luiz Antonio Moschini de Souza

REVISÃO GERAL

- Roberto Odilon Horta

PREFÁCIO

Os Guias de Inspeção de Equipamentos, emitidos pelo Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), têm por objetivo orientar a realização de inspeções em equipamentos da indústria do petróleo, petroquímica e química, podendo ser utilizados por outros tipos de indústrias que possuam equipamentos similares.

Os Guias contêm informações práticas sobre tipos de equipamentos usuais, mecanismos de danos que podem afetá-los, técnicas de inspeção usuais, aspectos de segurança individual do inspetor e aspectos da responsabilidade sobre a inspeção.

Os Guias de Inspeção elaborados pelo IBP, sob supervisão e orientação de profissional especializado, sintetizam as melhores práticas e experiência acumulada por profissionais de notório saber na área de Inspeção de Equipamentos em operação que compõem a Comissão de Inspeção de Equipamentos e respectivas Subcomissões Regionais de Inspeção de Equipamentos do IBP, que voluntariamente, decidiram colaborar com esta obra. Estas informações podem conter referências a padrões e normas de aplicação internacional cujas referências e autorias e direitos estão transcritas no capítulo “Bibliografia Sugerida”.

As informações contidas nos Guias são práticas recomendadas, não constituindo-se em regulamentações, padrões ou códigos mandatórios, sendo a aceitação e aplicação de responsabilidade exclusiva dos profissionais envolvidos nas inspeções.

Luiz Antonio Moschini de Souza
Coordenador Técnico

SUMÁRIO

1	Objetivo	13
	Campo de Aplicação	13
	Razões para Inspeção de Caldeiras.	13
2	Documentos de Referência	14
3	Definições e Nomenclatura	15
4	Tipos de Caldeira.	17
	Caldeiras Flamotubulares.	18
	Componentes de Caldeiras Flamotubulares	19
	Inspeção de Caldeiras Flamotubulares	20
	Caldeiras Aquatubulares	21
	Componentes de Caldeiras Aquatubulares	21
5	Causas de Deterioração e Avarias de Caldeira	30
	Sobreaquecimento	31
	Corrosão	33
	Corrosão das Superfícies em Contato com Água ou Vapor	34
	Corrosão da Superfície em Contato com os Gases Quentes	36
	Corrosão Atmosférica	39

Erosão e Corrosão-Erosão	40
Alterações na Estrutura Metalúrgica e Química	42
Ataque por Hidrogênio a Alta Temperatura	42
Grafitização	42
Deterioração do Refratário e do Isolamento	
Térmico	42
Avarias Mecânicas	43
Fluência	43
Fadiga	44
Fadiga Térmica	44
Explosão	45
6 Frequência e Programação de Inspeção	47
Obrigações Legais	47
Princípios e Orientações Gerais para a Inspeção	47
7 Preparativos para Inspeção de Caldeiras	48
Normas de Segurança	48
Condicionamento da Caldeira para Inspeção	49
8 Instrumentos e Ferramentas para Inspeção	50
Instrumental de Rotina	50
Instrumental Especial	50
Equipamentos Auxiliares	51
9 Inspeção de Caldeiras	51
Inspeção Externa	51
Escadas, Plataformas e Passadiços	51
Fundações	52

	Suportes Externos, Chaparia e Isolamento	52
	Vazamentos	52
	Câmara de Combustão (Fornalha)	53
	Inspeção Geral	53
	Tubulão e seus Dispositivos Internos	53
	Fornalha	54
	Superaquecedor	56
	Economizador	56
	Preaquecedor de Ar Tubular	57
	Preaquecedor a Vapor	57
	Preaquecedor de Ar do Tipo Regenerativo	57
	Dispositivos Auxiliares	58
	Tubulações	61
10	Resumo de Deteriorações e Avarias em Caldeiras e Ensaios	63
11	Teste Hidrostático	63
12	Cupons de Teste	65
13	Medições de Espessura	65
14	Reparos de Caldeiras	67
15	Registros e Relatórios	67
16	Avaliação de Integridade	68
17	Conservação de Caldeiras fora de Operação . . .	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático e nomenclatura para caldeiras aquatubulares	15
Figura 2 - Desenho esquemático e nomenclatura de caldeira aquatubular	15
Figura 3 - Desenho esquemático de caldeira aquatubular	16
Figura 4 - Desenho esquemático de caldeira flamotubular e principais componentes.	18
Figura 5 - Esquema de circulação de gases em caldeira flamotubular	19
Figura 6 - Vista geral de uma fornalha de caldeira compacta (em primeiro plano os tubos da parede d' água).	22
Figura 7 - Tubulões de vapor de caldeira antes da montagem	23
Figura 8 - Feixe de tubos aletados de economizador, exibindo desgaste superficial provocado pelos gases de combustão	24
Figura 9 - Desenho esquemático de preaquecedor rotativo.	25
Figura 10 - Colapso de chaminé de caldeira	25
Figura 11 - Queimadores de óleo e gás conjugados	27

Figura 12 - Queimador de caldeira a óleo exibindo deterioração	27
Figura 13 - Queimador de gás, óleo e carvão	28
Figura 14 - Ilustração de uma caldeira aquatubular com fornalha integrada mostrando a grande quantidade de feixes de tubo	29
Figura 15 - Serpentina exibindo deformação e flambagem, consequência de sobreaquecimento	32
Figura 16 - Tubo de parede d'água exibindo rompimento a alta temperatura (fluência localizada) .	33
Figura 17 - Tubo de caldeira exibindo "laranjas" . . .	33
Figura 18 - Serpentina de caldeira exibindo camada de depósitos provenientes de combustão . . .	36
Figura 19 - Tubo de superaquecedor de caldeira exibindo oxidação a alta temperatura	37
Figura 20 - Deterioração da camada de refratário de chaminé de caldeiras	38
Figura 21 - Detalhe de Corrosão atmosférica sob isolamento térmico na linha de dreno dos coletores de uma caldeira . . .	40
Figura 22 - Perfuração de tubos de caldeira em consequência de processo erosivo resultante de incidência de vapor dos sopradores de fuligem.	41
Figura 23 - Soprador de fuligem de fornalha exibindo erosão nos tubos adjacentes	41

Figura 24 - Exemplo de trincamento em coletor de vapor (videoscopia)	45
Figura 25 - Exemplo de explosão de câmara de combustão de caldeira	46
Figura 26 - Exemplo de explosão de caldeira pelo lado vapor	46
Figura 27 - Deterioração em queimador de óleo	56
Figura 28 - Deterioração da chaparia de preaquecedor rotativo	58
Figura 29 - Exemplo de curva de pressurização de caldeira	65

1 OBJETIVO

O objetivo deste guia é oferecer subsídios que sirvam como orientação para elaboração e implementação de planos para Inspeção de caldeiras, tomando como referência os documentos citados no capítulo 2 e as melhores práticas no âmbito da Indústria de Petróleo e Gás.

1.1 Campo de Aplicação

Este Guia orienta a inspeção para caldeiras em uso, priorizando o caráter preventivo. Não faz referência à inspeção de fabricação ou montagem destes equipamentos.

Neste Guia serão consideradas caldeiras a óleo, gás combustível, gás natural, e carvão mineral, uma vez que estas são as mais utilizadas na indústria do petróleo e gás.

O Guia está focado em caldeiras que produzem vapor a partir de água em detrimento àquelas que utilizam fluidos térmicos.

Embora sejam abordados alguns conceitos referentes a caldeiras flamotubulares, o maior enfoque será dado para caldeiras aquatubulares, uma vez que são mais frequentes no ramo de atividade abordado.

1.2 Razões para Inspeção de Caldeiras

As razões principais pelas quais uma caldeira deve ser inspecionada são as seguintes:

- ✓ Verificar se ocorre algum tipo de deterioração ou avaria, qual a sua extensão e até que ponto pode afetar a integridade do equipamento.
- ✓ Certificar-se que a caldeira opera dentro das condições de segurança estabelecidas no projeto.
- ✓ Garantir a continuidade da operação com o menor número possível de paradas imprevistas.
- ✓ Evitar as perdas decorrentes de uma parada de emergência de outras unidades de processo, em consequência de colapso na produção de vapor. É importante frisar que tais perdas podem ser altas.

- ✓ Reduzir os custos de manutenção e de operação.
- ✓ Manter o rendimento da unidade.
- ✓ Preservar a segurança das instalações, dos trabalhadores e da população.

2 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

A seguir estão indicados os documentos que foram utilizados como consulta para elaboração deste texto e cuja consulta pode ser necessária durante inspeções em caldeiras.

2.1 Documento preparado pelo GRINSP-RS e revisado pela Comissão de Inspeção de Equipamentos do IBP, detalhando as melhores práticas de inspeção para caldeiras.

2.2 Documento “Organização e Apresentação das Guias de Inspeção de Equipamentos do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás”, Revisão 2, de 24/05/1996.

2.3 Normas Regulamentadoras do Governo Federal:

- ✓ NR-13 - Caldeiras, Vasos de Pressão, Tubulações e Tanques Metálicos de Armazenamento;
- ✓ NR-26 - Sinalização de Segurança;
- ✓ NR-33 - Segurança e Saúde no Trabalho em Espaços Confinados;
- ✓ NR-35 - Trabalho em Altura.

2.4 Portaria 537/2015, do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO.

2.5 Portaria 582/2015, do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO.

2.6 ABNT NBR ISO 16528-1 Caldeiras e Vasos de Pressão - Requisitos de desempenho.

2.7 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section I: Rules for Construction of Power Boilers. ASME Section VII (Recommended Guidelines for the Care of Power Boilers)

2.8 National Board Inspection Code - NBIC.

2.9 ASME Sec. V - Nondestructive Examinations.

2.10 API RP 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry.

2.11 Apostila do Curso de Inspeção de Caldeiras do Professor Marcelo Salles.

3 DEFINIÇÕES E NOMENCLATURA

A nomenclatura adotada neste guia é apresentada nas figuras 1 e 2 e nas suas respectivas legendas.

O Brasil não possui nomenclatura padronizada para caldeiras, desta forma, utilizou-se a terminologia mais frequente na atividade de inspeção de equipamentos conforme as figuras 1, 2 e 3:

- 1 - Tubulão inferior ou de lama
- 2 - Coletores inferiores
- 3 - Piso da fornalha
- 4 - Queimadores
- 5 - Caixa de ar dos queimadores
- 6 - Tubos
- 7 - Chaparia externa
- 8 - Coletores superiores
- 9 - Ciclones
- 10 - Eliminadores de gotículas
- 11 - Tubulão superior ou de vapor
- 12 - Isolamento do tubulão
- 13 - Superaquecedor
- 14 - Septo
- 15 - Soprador de fuligem
- 16 - Porta de visita

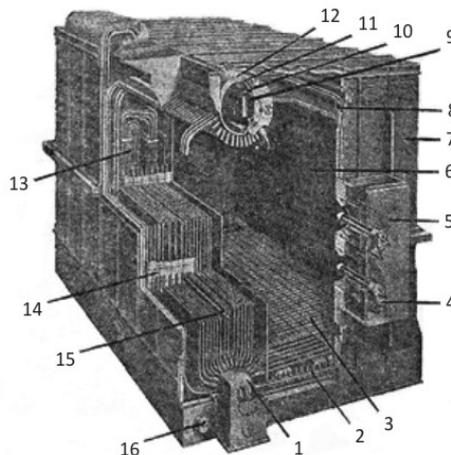


Figura 1 - Desenho esquemático e nomenclatura para caldeiras aquatubulares.

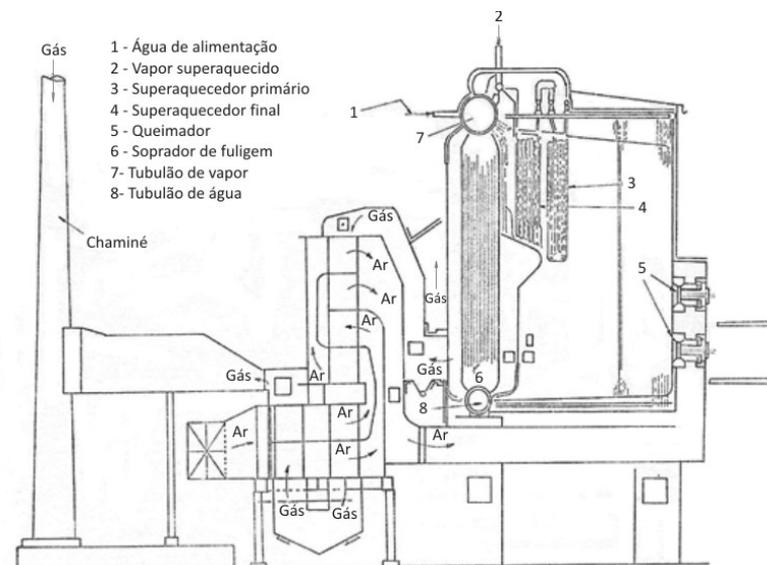


Figura 2 - Desenho esquemático e nomenclatura de caldeira aquatubular.

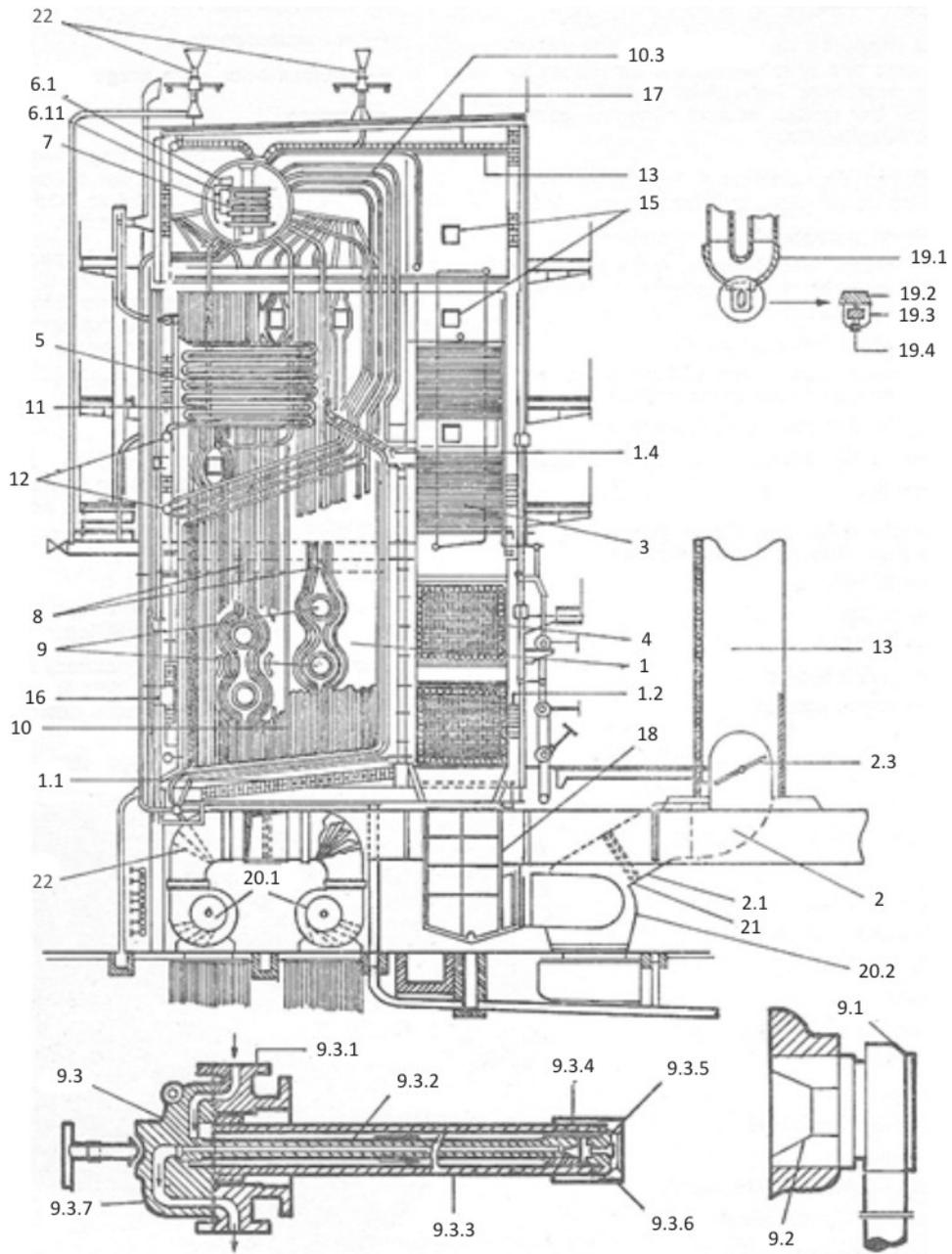


Figura 3 - Desenho esquemático de caldeira aquatubular
(nota: terminologia na próxima página).

- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| 1 - FORNALHA | 12 - COLETORES |
| 1.1 - Piso | 13 - CHAMINÉ |
| 1.2 - Paredes | 14 - CAIXA DOS CABEÇOTES |
| 1.3 - Abóbada | 15 - PORTA DE VISITA |
| 1.4 - Septo | 16 - JANELA DE INSPEÇÃO |
| 2 - DUTOS | 17 - REFRATÁRIOS |
| 2.1 - Paredes | 17.1 - Tijolos (*) |
| 2.2 - Aletas | 17.2 - Blocos (*) |
| 2.3 - Borboleta (*) | 17.3 - Argamassa (*) |
| 3 - ECONOMIZADOR | 18 - ISOLAMENTO |
| 4 - PRAQUECEDOR | 19 - CABEÇOTES |
| 5 - SUPERAQUECEDOR | 19.1 - Corpo |
| 6 - TUBULÃO | 19.2 - Plugue |
| 6.1 - Superior (*) | 19.3 - Travessa |
| 6.1.1 - Ciclone (*) | 19.4 - Parafuso |
| 6.2 - Inferior (*) | |
| 7 - RESFRIADOR DE VAPOR | 20 - VENTILADOR |
| 8 - SOPRADOR DE FULIGEM | 20.1 - De tiragem forçada |
| | 20.2 - De tiragem reduzida |
| 9 - QUEIMADOR | 21 - JUNTAS (*) |
| 9.1 - Caixa de ar | 22 - VÁLVULA DE SEGURANÇA E ALÍVIO |
| 9.2 - Cone difusor | |
| 9.3 - Maçarico | |
| 9.3.1 - Corpo | |
| 9.3.2 - Tubo interno | |
| 9.3.3 - Tubo externo | |
| 9.3.4 - Atomizador | |
| 9.3.5 - Bico | |
| 9.3.6 - Porca de fixação de bico | |
| 9.3.7 - Cabeçote | |
| 10 - TUBOS | |
| 10.1 - Água (*) | |
| 10.2 - Gás (*) | |
| 10.3 - Vapor (*) | |
| 11 - TAMPА INVERSORA (*) | |

Legenda da Figura 3

4 TIPOS DE CALDEIRAS

As caldeiras podem ser agrupadas em dois tipos básicos de acordo com o posicionamento relativo entre a água e os gases quentes:

- ✓ Caldeiras flamotubulares.
- ✓ Caldeiras aquatubulares.

4.1 Caldeiras Flamotubulares

São caldeiras largamente usadas, com a finalidade de produzir vapor saturado em baixas pressões, da ordem de 4 a 19 kgf/cm², em quantidades pequenas ou moderadas. A capacidade de produção de vapor destas caldeiras varia de algumas centenas de quilos até cerca de 10 toneladas de vapor por hora.

As caldeiras flamotubulares consistem essencialmente de um corpo cilíndrico com dois espelhos fixos nos quais os tubos são mandrilhados ou soldados. A água contida no corpo cilíndrico envolve os tubos enquanto os gases aquecidos circulam pela parte interna dos tubos.

Nas caldeiras flamotubulares, os gases de combustão circulam no interior de tubos lisos ou corrugados, os quais encontram-se imersos em água. Neste tipo de caldeira os gases de combustão passam no interior de tubos cercados de água.

A transferência de calor ocorre em toda a área circunferencial dos tubos, os quais são montados de forma similar a um trocador de calor com feixe tubular. Essas caldeiras podem ser construídas com tubos na posição vertical ou horizontal.

Em uma das extremidades situa-se a fornalha, de modo que os gases resultantes da combustão passando por dentro dos tubos, cedem calor à água.

As caldeiras flamotubulares têm como vantagem principal a facilidade de colocação e retirada em operação, o baixo custo e a maior tolerância para trabalho com águas não tratadas. Como principais desvantagens destacamos: baixo rendimento térmico, baixa capacidade de produção, baixas pressões de operação e inviabilidade de produzirem vapor superaquecido.

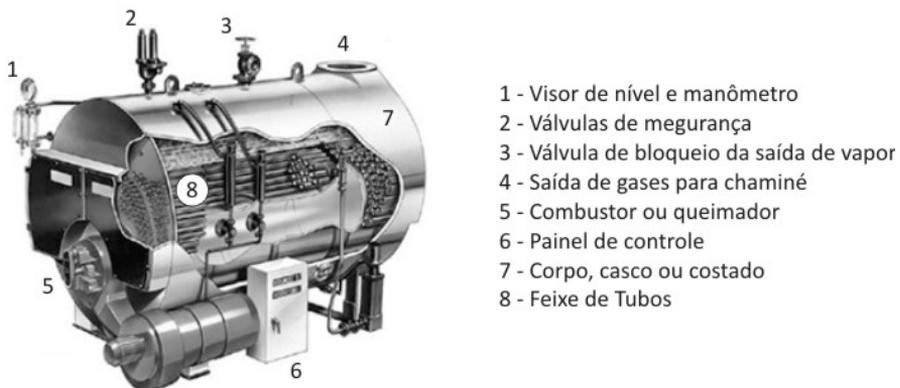


Figura 4 - Desenho esquemático de caldeira flamotubular e principais componentes.

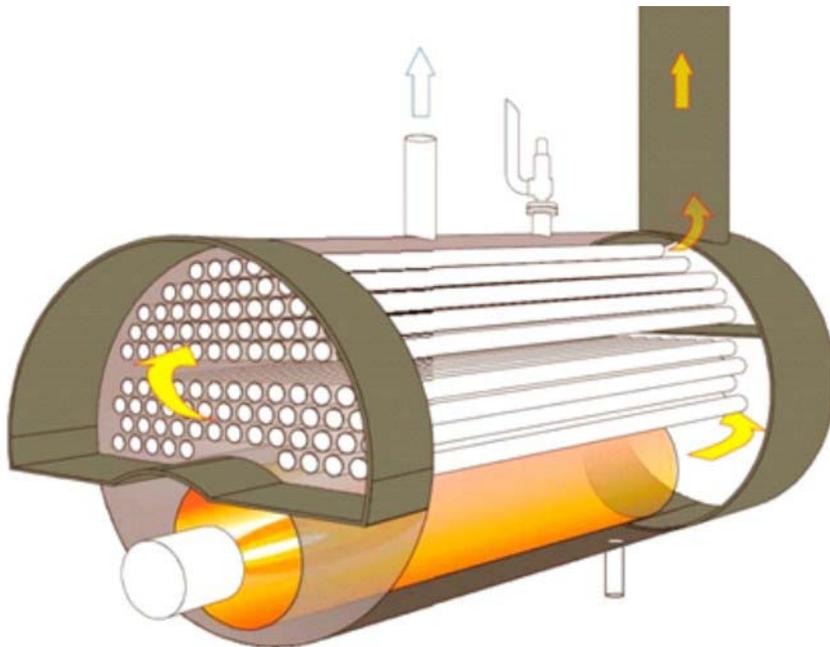


Figura 5 - Esquema de circulação de gases em caldeira flamotubular.

4.1.1 Componentes de Caldeiras Flamotubulares

A seguir são listados os principais componentes das caldeiras flamotubulares e a nomenclatura adotada neste guia.

4.1.1.1 Componentes Mecânicos

- ✓ Fornalha (lisa ou corrugada)
- ✓ Espelhos
- ✓ Feixe de tubos
- ✓ Costado
- ✓ Tubos tirantes ou nervuras para reforço dos espelhos
- ✓ Câmara de reversão frontal
- ✓ Câmara de reversão traseira
- ✓ Tampa traseira
- ✓ Tampa frontal
- ✓ Trapézio
- ✓ Refratários
- ✓ Isolamento térmico
- ✓ Chaminé

4.1.1.2 Válvulas e Sistemas Operacionais

- ✓ Válvula principal de saída de vapor
- ✓ Válvula de segurança

4.1.1.3 Sistema de descarga de fundo

- ✓ Válvula de bloqueio
- ✓ Válvula de descarga rápida
- ✓ Sistema de Vapor de Atomização
- ✓ Sistema de Ar de Atomização (Para Partida)

4.1.1.4 Equipamentos Auxiliares

- ✓ Queimador e sistema de controle de queima e purga dos gases de combustão
- ✓ Bomba d'Água de Alimentação
- ✓ Ventilador de Ar de Combustão
- ✓ Exaustor dos Gases de Combustão
- ✓ Bomba de Óleo Combustível Principal
- ✓ Vaso de Descarga de Fundo

4.1.1.5 Instrumentação

- ✓ Manômetro
- ✓ Termômetro
- ✓ Pressostato
- ✓ Visor de Nível (tubular ou reflexivo)
- ✓ Alarmes e painel de controle
- ✓ Garrafa de nível (de ampola ou eletrodos)

4.1.2 Inspeção de Caldeiras Flamotubulares

A inspeção periódica de caldeiras flamotubulares pode ser dividida basicamente em duas etapas distintas: inspeção a frio e inspeção a quente.

4.1.2.1 Inspeção a Frio

Com a caldeira parada devem ser criteriosamente analisados todos os componentes externos e internos citados anteriormente.

4.1.2.2 Inspeção a Quente

Com a caldeira em operação, são testados todos os sistemas de controle e de segurança conforme segue:

- ✓ pressostatos;
- ✓ teste de abertura das válvulas de segurança;
- ✓ ensaio de suficiência dos dispositivos de alimentação d'água;
- ✓ simulação de falta d'água;
- ✓ teste de acumulação.

Diversos aspectos de inspeção destacados para as caldeiras aquatubulares também são aplicáveis para as caldeiras flamotubulares, desta forma, recomenda-se a leitura do capítulo referente a inspeção de caldeiras aquatubulares.

4.2 Caldeiras Aquatubulares

Nas caldeiras aquatubulares a água e o vapor circulam pela superfície interna dos tubos enquanto o fogo e os gases quentes estão presentes na superfície externa.

As caldeiras aquatubulares são utilizadas preferencialmente em grandes complexos Industriais já que necessitam de água com tratamento muito apurado, são complexas de serem operadas e não permitem paradas frequentes.

As caldeiras aquatubulares são projetadas para produzir vapores com pressão bastante elevadas (entre 20 kgf/cm² e 400 kgf/cm²) em vazões muito altas (entre 10 ton/h e 1 800 ton/h). O vapor produzido pode ser saturado, mas geralmente é superaquecido podendo superar temperaturas de 600 °C.

Dentro deste tipo de caldeiras existem várias configurações de projeto, entre as quais citamos:

- ✓ caldeiras com um tubulão, coletores seccionais e tubos retos;
- ✓ caldeiras com um tubulão e tubos curvos;
- ✓ caldeiras com dois tubulões e tubos curvos;
- ✓ caldeiras com três tubulões e tubos curvos;
- ✓ caldeiras sem tubulões (caldeiras de passe único).

4.2.1 Componentes de Caldeiras Aquatubulares

As figuras 6, 7 e 8 indicam os principais componentes de uma caldeira aquatubular cuja função descreve-se sucintamente a seguir.

Fornalha - Região onde ocorre a queima do combustível (gás, óleo, carvão, lenha, etc.). A fornalha também pode ser denominada Câmara de Combustão. Nesta região encontram-se os tubos que formam as paredes da água.

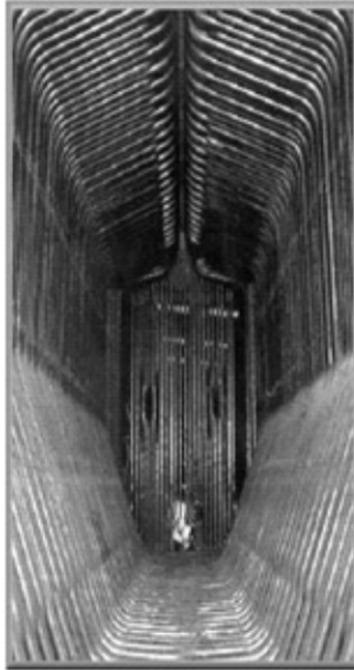


Figura 6 - Vista geral de uma fornalha de caldeira compacta (em primeiro plano os tubos da parede d'água).

Tubulão de Vapor (tambor ou balão superior) - O tubulão ou tambor de vapor é um vaso de pressão cilíndrico onde se dá a separação das fases água-vapor e onde é feita a injeção de água na caldeira. O tubulão superior normalmente possui internos para facilitar a separação da água e vapor. O tubulão normalmente possui milhares de orifícios onde são fixados por mandrilamento (expansão) os tubos da caldeira.



Figura 7 - Tubulões de vapor de caldeira antes da montagem (Fonte: MF Rural).

Tubulão de Lama (tambor ou balão inferior) - O tubulão ou tambor de lama é um vaso de pressão cilíndrico que tem como finalidade coletar e separar sólidos presentes na água e permitir a purga do sistema. Nem toda caldeira aquatubular possui este componente. Os tubulões inferiores geralmente não possuem internos.

Superaquecedor - É um conjunto de serpentinas dentro das quais circula o vapor saturado que ao ser aquecido passa a vapor superaquecido. O superaquecedor é o componente com maior temperatura da caldeira e pode ser construído com materiais mais refratários. Conforme a sua localização e a maneira pela qual se dá a maior troca de calor, o superaquecedor pode ser classificado como sendo de:

- ✓ irradiação;
- ✓ convecção;
- ✓ irradiação e convecção.

Economizador - É o componente onde a água de alimentação troca calor e aumenta de temperatura antes de ingressar no tubulão superior. Este componente aproveita o calor residual dos gases do combustão, antes de saírem pela chaminé.

A função do Economizador é recuperar parte do calor perdido na chaminé e evitar o choque térmico resultante da entrada de água fria no tubulão superior.

Como a troca de calor no economizador é por processo de convecção geralmente seus tubos são aletados.

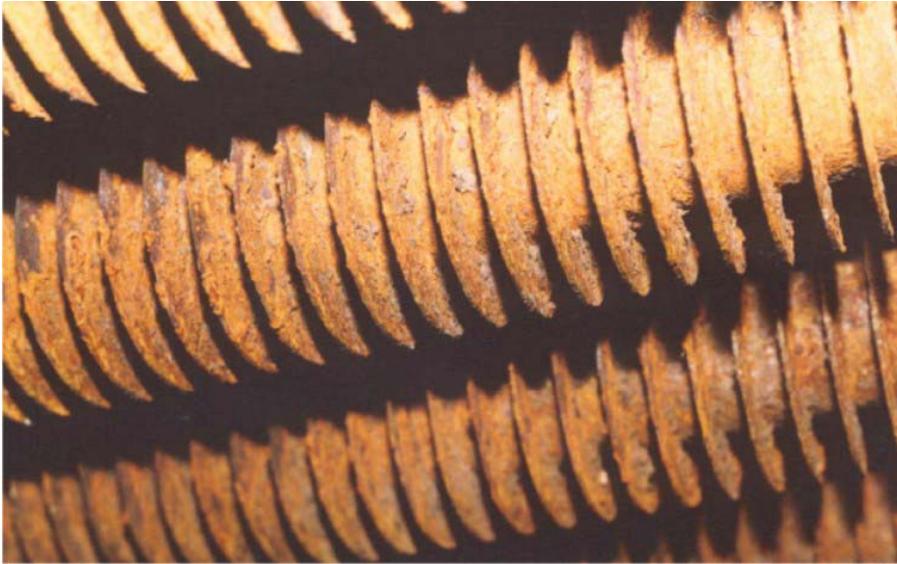


Figura 8 - Feixe de tubos aletados de economizador, exibindo corrosão superficial provocado pelos gases de combustão.

Preaquecedor de ar - O preaquecedor de ar é basicamente um permutador de calor destinado a aquecer o ar a ser utilizado na combustão.

Algumas caldeiras possuem dois tipos de preaquecedores, a gás e a vapor.

O Preaquecedor a gás troca calor entre o ar e os gases de combustão que deixam a caldeira.

No preaquecedor de ar a vapor, a troca de calor é feita entre o ar e o vapor. Estes componentes são importantes para a partida da caldeira ocasião na qual os gases de combustão ainda não estão suficientemente aquecidos.

Algumas caldeiras dispõem de preaquecedor de ar tipo regenerativo, tipo *Ljungström*, que corresponde a um conjunto de favos de chapas metálicas muito finas, montados em torno de um eixo, cuja rotação lenta expõem estes componentes alternativamente à corrente de gás quente que sai da caldeira em direção à chaminé e à corrente de ar frio, insuflada pelos ventiladores.

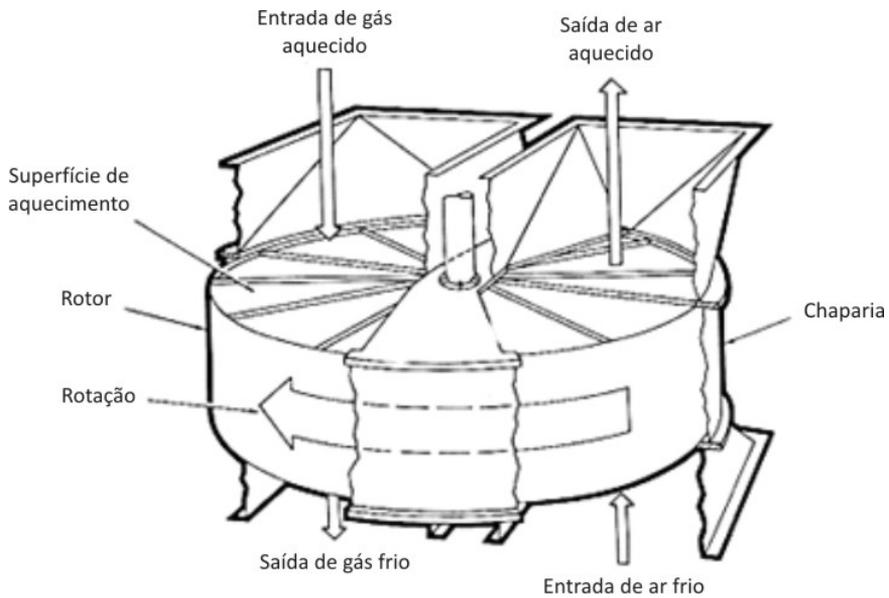


Figura 9 - Desenho esquemático de preaquecedor rotativo.

Chaminé - Destina-se a promover a circulação dos gases quentes provenientes da combustão por todos os componentes da caldeira.

Existem chaminés de tiragem natural, onde a circulação ocorre apenas por diferença de temperatura e densidade dos gases e, chaminés de tiragem forçada ou induzida onde a circulação é auxiliada por sopradores e ou exaustores.



Figura 10 - Colapso de chaminé de caldeira.

Reaquecedor - É um conjunto de serpentinas similares aos superaquecedores, que reaquecem o vapor de extração intermediária de turbinas de condensação, para posterior reenvio à turbina para condensação total. Este componente pode não existir em algumas caldeiras.

Dessuperaquecedor ou Atemperador - Tem como função reduzir a temperatura do vapor superaquecido. Este componente é utilizado para o controle de temperatura das caldeiras. É um componente formado normalmente por um coletor de vapor e um conjunto de bicos injetores de água. Estes componentes merecem muito cuidado, pois podem apresentar trincamento decorrente de fadiga térmica.

Precipitador eletrostático - Este componente é instalado em caldeiras com combustíveis sólidos particulados, tipo carvão. São componentes de grandes dimensões, constituídos por um conjunto de placas coletoras e eletrodos através dos quais é criado um campo elétrico que provocará a coleta das cinzas presentes no fluxo de gás. Estes equipamentos ficam instalados imediatamente antes da entrada dos gases nas chaminés. Possuem alta capacidade de retenção, acima de 99,5 %. Posteriormente esta cinza é removida das placas coletoras e utilizada em várias aplicações industriais como componente do cimento, por exemplo.

Queimadores - São componentes destinados a atomizar e promover a queima de combustíveis inseridos na fornalha. São fundamentais nas caldeiras, pois afetam o rendimento da caldeira e a emissão de poluentes (NOx e CO). Existem queimadores específicos para cada aplicação e para cada combustível. Em algumas caldeiras que são projetadas para queimar diferentes combustíveis podem existir modelos distintos de queimadores.



Figura 11 - Queimadores de óleo e gás conjugados.



Figura 12 - Queimador de caldeira a óleo exibindo deterioração.



Figura 13 - Queimador de gás, óleo e carvão.

Coletores - São tubulações que coletam as várias correntes de água e vapor da caldeira. Nas caldeiras de grande porte estas tubulações possuem diâmetros e espessuras maiores e necessitam de maiores cuidados da inspeção.

Tubos - Os tubos das caldeiras são geralmente de aço-carbono com diâmetro entre 50 e 75 mm. Dependendo do tamanho uma caldeira pode possuir alguns milhares de tubos. Sua função é conduzir a água e o vapor assim como fazer a troca térmica. Os tubos geralmente são mandrilados nos tubulões. Os tubos que compõem a fornalha são unidos entre si por aletas cuja função é bloquear a passagem dos gases de combustão. Esta construção é conhecida como "Parede d'água".

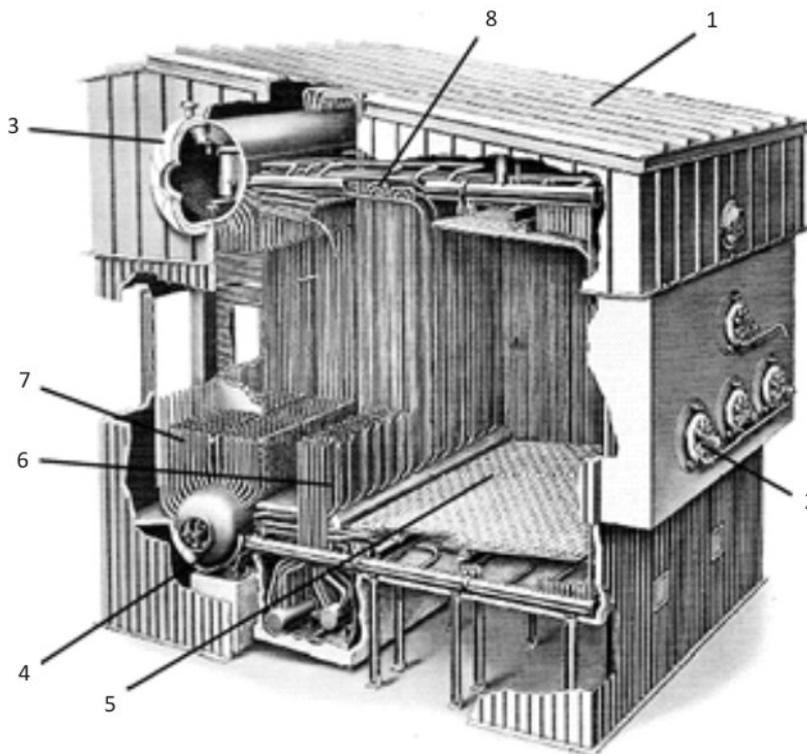


Figura 14 - Ilustração de uma caldeira aquatubular com fornalha integrada mostrando a grande quantidade de feixes de tubo.

Válvulas de Segurança - São dispositivos utilizados para impedir que a pressão interna da caldeira ultrapasse os limites estabelecidos no projeto. Caldeiras flamotubulares geralmente possuem duas válvulas ligadas ao corpo ou casco enquanto caldeiras aquatubulares geralmente possuem duas válvulas de segurança no tubulão superior e uma no superaquecedor. Essa formação pode variar conforme o projetista.

As válvulas de segurança de caldeiras devem estar ligadas diretamente ao corpo da caldeira, isto é, sem bloqueios e devem abrir sem auxílio do operador quando ocorrer um aumento excessivo de pressão.

4.2.2 Equipamentos e Dispositivos Auxiliares

- ✓ ventiladores;
- ✓ sopradores de fuligem;
- ✓ dutos de ar;

- ✓ dutos de gases de combustão;
- ✓ instrumentação;
- ✓ sistema de água de alimentação/desaerador.

5 CAUSAS DE DETERIORAÇÃO E AVARIA DE CALDEIRAS

São numerosas as causas que provocam a deterioração ou avaria dos componentes de uma caldeira e em seus equipamentos e dispositivos auxiliares. Entre as principais podemos citar:

- ✓ sobreaquecimento (Nota 1);
- ✓ corrosão;
- ✓ erosão e corrosão-erosão;
- ✓ mudança de estrutura metalográfica e mudança química;
- ✓ deterioração do refratário e do isolamento térmico;
- ✓ avarias mecânicas.

Nota 1: Sobreaquecimento, neste Guia, significa a elevação da temperatura do aço a um nível acima daquele previsto no projeto. Não confundir com o termo "superaquecimento" usualmente adotado na metalurgia que significa uma elevação de temperatura até as zonas mais altas do campo austenítico.

Adotou-se a seguinte padronização de terminologia para os mecanismos de falhas em tubos.

Ruptura sob Tensão

Sobreaquecimento de Curta Duração

Sobreaquecimento de Longa Duração (Fluência)

Corrosão Lado Água e Vapor

Corrosão Cáustica

Danos por Hidrogênio

Corrosão Localizada (*Pitting*)

Corrosão sob Tensão

Corrosão das Partes Expostas ao Calor

Corrosão na Zona de Baixa Temperatura

Corrosão na Parede de Água (Lado Fogo)

Corrosão por Cinzas de Carvão à Alta Temperatura

Corrosão por Cinzas de Óleo à Alta Temperatura

Grafitização e Oxidação

Erosão

Erosão por Cinzas Leves

Erosão por Cinzas Fundentes (Escórias)

Erosão na região dos Sopradores de Fuligem

Erosão por Partículas de Combustível Sólido

Fadiga

Fadiga por Vibração

Fadiga Térmica

Fadiga por Corrosão

Falta de Controle de Qualidade

Danos causados por Limpeza e preparação de superfície

Danos causados por produtos Químicos

Defeitos em Materiais

Defeitos em Solda

5.1 Sobreaquecimento

O sobreaquecimento dos componentes da caldeira responde por grande número dos danos registrados. Esta condição pode resultar de uma série de diferentes condições, entre as quais citamos:

- ✓ funcionamento inadequado dos queimadores, provocando a incidência de chama sobre os tubos;
- ✓ desaeração insuficiente durante os procedimentos de partida da caldeira;
- ✓ incrustação excessiva na parede interna dos tubos em consequência de tratamento inadequado de água de alimentação;
- ✓ redução excessiva do nível de água no tubulão;
- ✓ circulação deficiente da água por obstrução parcial ou total de tubos em consequência de deposição interna, ou por erro de projeto ou montagem;
- ✓ queda ou desgaste de refratário de proteção da chaparia ou elementos estruturais internos.
- ✓ causa queima desbalanceada (vórtice não centralizado)

O sobreaquecimento de componentes da caldeira pode acarretar numerosos danos, sendo os principais apresentados a seguir:

- ✓ deformação da seção transversal de tubos comumente conhecido por "laranja", resultante da fluência do material, podendo levá-lo até a ruptura;

- ✓ mudança de estrutura do material, principalmente grafitização, responsável pela diminuição de sua resistência à tração, e à fluência.
- ✓ flambagem ou abaulamento de tubos;
- ✓ oxidação das superfícies expostas, se o meio for oxidante e carbonetação, se o meio for redutor.



Figura 15 - Serpentina exibindo deformação e flambagem, consequência de sobreaquecimento.

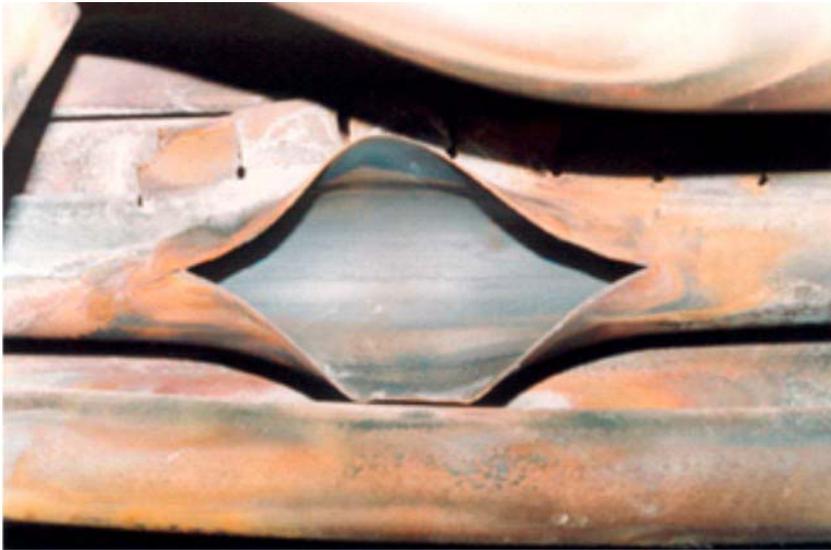


Figura 16 - Tubo de parede d'água exibindo rompimento a alta temperatura (fluência localizada).



Figura 17 - Tubo de caldeira exibindo "laranjas"
(Fonte: Nalco).

5.2 Corrosão

A corrosão constitui o maior fator de deterioração de caldeiras, afetando as superfícies interna e externa das partes pressurizadas, bem como os demais componentes de sua estrutura (colunas, chaparia, etc.).

5.2.1 Corrosão das Superfícies em Contato com Água ou Vapor

Essa superfície é a parte interna dos tubos e tubulões no caso de caldeiras aquatubulares ou a superfície externa dos tubos e interna do casco no caso de caldeiras flamotubulares.

A corrosão dessas superfícies depende fundamentalmente da natureza da água de alimentação, da eficiência do seu tratamento, do seu teor de O_2 /gases dissolvidos e do pH.

O corrosivo nesta situação pode se manifestar de forma uniforme, quando há uma perda constante de espessura ao longo de toda a superfície ou, de forma localizada quando a corrosão varia ao longo da superfície ou só ocorre em determinadas regiões.

A corrosão uniforme normalmente está prevista pelos códigos de projeto e pode ser facilmente determinado e monitorado através de medições de espessura.

A corrosão localizada nem sempre é previsível e pode ser de difícil detecção e localização.

A corrosão em caldeiras pelo lado da água ou vapor geralmente se apresenta sob as seguintes formas:

- ✓ corrosão por aeração diferencial;
- ✓ corrosão por pites;
- ✓ corrosão química;
- ✓ fragilização cáustica (fendilhamento cáustico);
- ✓ corrosão galvânica;
- ✓ corrosão acelerada devido ao fluxo de vapor úmido.

5.2.1.1 Corrosão por Aeração ou Concentração Diferencial

Esta forma de corrosão pode resultar da presença de O_2 dissolvido na água e ocorre geralmente onde a água escoar no estado líquido, observando-se o ataque sob depósito causado por célula de aeração diferencial. Este fenômeno também pode ocorrer em frestas.

5.2.1.2 Corrosão por Pites

A presença de impurezas na água, combinada com tensões localizadas, pode dar origem a pequenas áreas anódicas que propiciam o desenvolvimento de pites.

Pode resultar também da presença de CO_2 que torna a água fracamente acidificada o suficiente para provocar a formação de pites.

5.2.1.3 Fragilização Cáustica

Este fenômeno, também conhecido como fendilhamento cáustico ocorre quando aços-carbono são expostos à ação de soluções fortemente alcalinas a altas temperaturas e pressões elevadas.

A intensidade do ataque depende da concentração do álcali, da temperatura e da grandeza das tensões e geralmente é mais acentuada em regiões de vaporização. Esse fenômeno é um tipo de corrosão sob tensão.

5.2.1.4 Fragilização pelo Hidrogênio

Não é um processo comum em caldeiras. Pode ocorrer em caldeiras de pressão elevada (Acima de 120 kgf/cm²) e em situações de descontrole do pH da água de caldeira.

Existem várias teorias para explicar o efeito da difusão de hidrogênio na estrutura cristalina dos materiais de caldeiras, entre elas reação com o carbono do material e formação de metano e/ou aumento da pressão interna a estrutura cristalina. Geralmente o material se comporta de forma frágil e aparecem fissuras.

5.2.1.5 Corrosão Galvânica

A corrosão galvânica pode ocorrer na superfície interna do tubulão e na superfície interna dos tubos de caldeiras aquatubulares ou, na superfície interna do casco e externa dos tubos de caldeiras flamotubulares.

Essa corrosão ocorre em função do carregamento de partículas metálicas como causa de contaminação (cobre e bronze) a perda do material de tubos de trocadores de calor do circuito água/vapor, acho mais corriqueiro que advindo dos mancais da turbina para o interior da caldeira. Essas partículas se depositam em regiões de menor velocidade formando pilhas galvânicas.

5.2.1.6 Corrosão Acelerada devido ao Fluxo de Vapor Úmido

Corrosão acelerada por fluxo (conhecido internacionalmente como FAC = *Flow Accelerated Corrosion*) é um fenômeno que resulta da perda de metal de tubos e componentes fabricados em aço-carbono.

Isto ocorre sob determinadas condições de fluxo, geometria e material, os quais são comuns em tubulações de elevadas solicitações mecânicas em usinas nucleares, usinas de combustível fóssil e de instalações industriais.

Os fatores que mais influenciam na corrosão acelerada devido ao fluxo são os seguintes:

- ✓ Fatores hidrodinâmicos tais como: velocidade de fluxo, rugosidade do tubo, geometria do caminho do fluxo, qualidade do vapor ou fluxo contendo 2 fases (água/vapor).
- ✓ Fatores relacionados ao ambiente interno nas tubulações tais como: temperatura, pH, agente redutor, concentração de oxigênio, potencial de redução e oxidação, impurezas na água.
- ✓ Fatores metalúrgicos, principalmente a composição química do aço. Foi determinado que o elemento mais benéfico nos aços é o Cromo. Um aço contendo liga de cromo acima de 1 % terá irrelevante taxa de corrosão acelerada por fluxo. Há evidência de que o uso de cromo em valores menores, em até 0,1 %, pode reduzir a corrosão acelerada.

Nas caldeiras, este fenômeno ocorre com maior frequência em economizadores e redes externas de drenagens.

5.2.2 Corrosão da Superfície em Contato com os Gases Quentes

Este tipo de corrosão é provocada geralmente por compostos agressivos formados no processo de combustão, provenientes de impurezas contidas no combustível, sendo as mais comuns o enxofre, o vanádio, o sódio e, às vezes, o níquel e o potássio.



Figura 18 - Serpentina de caldeira exibindo camada de depósitos provenientes de combustão.

5.2.2.1 Corrosão Química Generalizada

Uma das formas de corrosão química generalizada ocorre quando o aço-carbono atinge temperaturas superiores a 550 °C. Nesta situação a oxidação a alta temperatura passa a ser significativa com evolução da seguinte reação:



O produto da reação dá origem a uma incrustação cujo crescimento é influenciado por vários fatores, principalmente temperatura, tempo e alimentação do agente oxidante (vapor, neste caso).

Este tipo de ataque cria condições que permitem o sobreaquecimento do metal, uma vez que a incrustação normalmente apresenta uma forte resistência térmica, conforme ilustrado na figura a seguir:



Figura 19 - Tubo de superaquecedor de caldeira exibindo oxidação a alta temperatura.

5.2.2.2 Corrosão por Compostos de Enxofre

Os compostos de enxofre mais comuns são o SO_2 e SO_3 cuja ação corrosiva se manifesta onde as temperaturas são moderadas, quando há condensação de vapor d'água, dando origem a formação de ácido

sulfúrico. Nessas condições os componentes mais sujeitos ao seu ataque são o preaquecedor de ar, o economizador e a chaminé.

A baixa temperatura dos gases efluentes da chaminé tem influência direta sobre a condensação de compostos de enxofre e o processo de corrosão. Cuidados especiais devem ser considerados desde a fase de projeto. Uma ótima referência para temperaturas dos gases pode ser obtida no API 571, que define em função da composição dos gases a temperatura mínima para evitar o chamado "dew point" - ponto de orvalho. Recomenda-se que a temperatura fique acima de 160 °C na saída da chaminé.

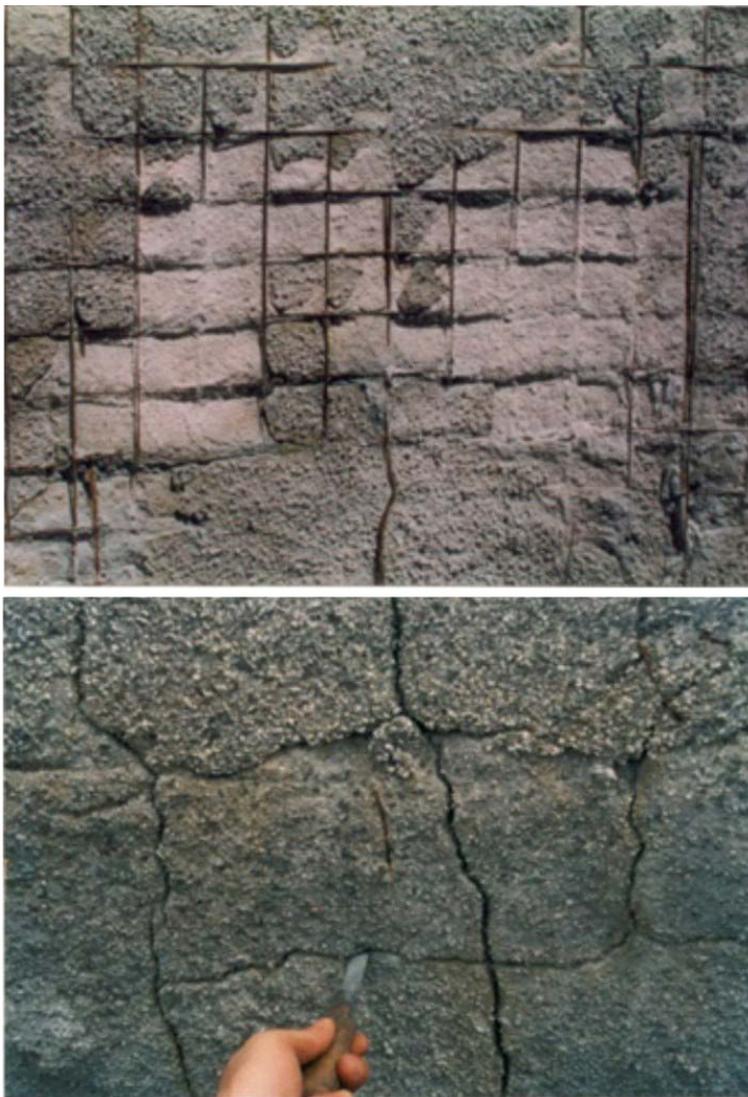


Figura 20 - Deterioração da camada de refratário de chaminé de caldeiras.

5.2.2.3 Corrosão por Compostos de Vanádio e Sódio

Quando o combustível utilizado na caldeira contém vanádio, sódio e enxofre, durante a combustão pode haver condições para formação de pentóxido de vanádio (V_2O_5) e o sulfato de sódio (Na_2SO_4).

A associação do V_2O_5 com o Na_2SO_4 , constitui o corrosivo mais ativo que se conhece, nos produtos de combustão. Ataca praticamente todos os materiais metálicos, mesmo as ligas mais nobres. A mistura destes dois compostos produz um eutético de baixo ponto de fusão, de modo tal que as cinzas depositadas sobre os tubos da fornalha facilmente se fundem e fluem, atacando intensamente o material.

O ataque por estes compostos, entretanto, só se registra nas zonas de mais alta temperatura. Esta corrosão é mais acentuada entre 550 °C e 800 °C e pode atingir mais frequentemente o refratário, lanças e bicos de queimadores e regiões do superaquecedor.

5.3 Corrosão Atmosférica

A estrutura externa da caldeira - colunas, chaparia, escadas, plataformas, etc. - está sujeita à corrosão atmosférica. Esta é influenciada principalmente pela umidade relativa, temperatura do ambiente e da superfície, natureza da atmosfera (marítima, industrial ou rural).

Uma variante de corrosão atmosférica que também pode ocorrer é a *Corrosão Sob Isolamento* térmico. O fenômeno ocorre em superfícies isoladas que operam de forma intermitente ou que operam entre 20 °C e 100 °C. Seu efeito, muitas vezes só é identificado após a ocorrência de vazamentos e incêndios, gerando paradas de emergência e custos inesperados de manutenção.

Os aspectos referentes à corrosão atmosférica e da Corrosão sob Isolamento são mais acentuados em caldeiras que ficam em hibernação por um período.



Figura 21 - Detalhe de Corrosão atmosférica sob isolamento térmico na linha de dreno dos coletores de uma caldeira.

5.4 Erosão e Corrosão-Erosão

Este processo é mais frequente em regiões próximas aos sopradores de fuligem (ramonadores). Normalmente ocorre em função do desalinhamento dos sopradores fazendo com que o jato de vapor condensado incida diretamente sobre os tubos.

Pode resultar também de jato de vapor e/ou condensado proveniente de vazamento através de juntas defeituosas, gaxetas ou mesmo furos, pois o jato de condensado tem uma ação erosiva muito intensa.

A corrosão-erosão é um fenômeno que resulta da ação simultânea de erosão e corrosão, cujos efeitos são bem maiores que a soma dos efeitos de cada uma, agindo isoladamente.

Para caldeiras, as quais utilizam combustíveis sólidos (carvão, lenha, etc) deve-se atentar para o fenômeno da erosão por cinzas leves. Este tipo de erosão é mais intenso em zonas da caldeira onde predominam estreitamento de área de passagem de gases e em locais de mudança brusca de direção destes.



Figura 22 - Perfuração de tubos de caldeira em consequência de processo erosivo resultante de incidência de vapor dos sopradores de fuligem.



Figura 23 - Soprador de fuligem de fornalha exibindo erosão nos tubos adjacentes.

5.5 Alterações na Estrutura Metalúrgica e Química

Dentre as possíveis alterações que podem ocorrer em caldeiras citamos:

5.5.1 Ataque por Hidrogênio a Alta Temperatura

Este fenômeno tem sido verificado em caldeiras de alta capacidade de produção com pressão e temperaturas elevadas.

O fenômeno ocorre em função da decomposição da água com a consequente liberação de oxigênio e hidrogênio. Este hidrogênio livre se difunde através do metal e age sobre a cementita, decompondo-a em ferrita e carbono com o qual reage para formar metano. Desse modo, além de enfraquecer o metal pela perda de carbono e alteração metalúrgica, ainda permite o empolamento pelo metano que agrava o problema. Tem sido constatado que o fenômeno também está associado à porosidade dos depósitos e da presença de pH baixo.

5.5.2 Grafitação

O processo mais comum de grafitação secundária envolve a decomposição da perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), onde, em altas temperaturas, o carboneto de ferro Fe_3C (cementita) se transforma em ferro metálico e carbono livre (grafita).

A grafitação pode ocorrer nas serpentinas de aço-carbono do superaquecedor quando opera a temperaturas superiores a 450 °C. O fenômeno também pode ocorrer em partes não pressurizadas tais como, chaparia e estruturas internas quando ocorre a queda da proteção de refratário.

Em geral, a grafitação ocorre em aços-carbono e aços baixa liga (com silício e molibdênio) sujeitos a serviços em altas temperaturas (entre 427 e 593 °C), causando perda de resistência mecânica, ductilidade e resistência à fluência. O processo depende da composição do aço, da microestrutura e da temperatura de exposição.

5.6 Deterioração do Refratário e do Isolamento Térmico

Quando as cinzas do combustível entram em contato com o refratário em temperaturas elevadas, pode ocorrer a formação de uma escória cuja fluidez é aumentada pela presença de óxidos metálicos, mormente os de vanádio e molibdênio, além de sais e enxofre.

A formação desta escória pode acarretar a deterioração do refratário, pelo menos de três modos diferentes:

- ✓ fusão e conseqüente escoamento;
- ✓ ação química;
- ✓ penetração.

Como conseqüência podemos ter uma redução de espessura do refratário, permitindo assim que a estrutura de sustentação e chaparia sejam submetidas a uma temperatura mais elevada do que a estabelecida no projeto.

Os gases de combustão se difundem através da parede refratária e vão atacar o isolamento, principalmente, quando este é lã de rocha, havendo a formação de compostos que corroem a chaparia externa. Por outro lado, em conseqüência do ataque, o isolamento sofre um aumento de volume que conduz a esforços mecânicos que danificam a parede refratária.

5.7 Avarias Mecânicas

A seguir listamos as falhas mecânicas mais frequentes em caldeiras:

- ✓ fadiga, tanto mecânica como térmica;
- ✓ fluência;
- ✓ tensões anormais impostas ao material;
- ✓ uso inadequado de ferramentas ou outros meios de limpeza;
- ✓ mandrilagem defeituosa dos tubos;
- ✓ recalque das fundações;
- ✓ cargas externas excessivas resultantes de tubulação e outros dispositivos conectados à caldeira e mal apoiados;
- ✓ explosão na câmara de combustão.

5.7.1 Fluência

Fluência pode ser definida como uma deformação gradual e que ocorre em materiais tensionados quando estes estão submetidos a altas temperaturas por um longo período de tempo.

Em caldeiras as partes mais sujeitas a este fenômeno são o superaquecedor e seus coletores. A fluência manifesta-se na prática através do aumento de diâmetro do tubo ou de seu comprimento com conseqüente flambagem.

Normalmente quando os tubos sofrem aumento de diâmetro também ocorre uma redução de espessura da parede. Esse fenômeno pode provocar deformação (laranja ou abaulamento), rompimento ou trincamento.

O tempo para manifestação deste fenômeno depende do nível de tensões, do material e da temperatura.

A maioria dos códigos de projeto prevê uma vida a fluência de 100 000 horas de exposição ao calor. Um critério bastante prático é substituir os componentes sempre que seu diâmetro tenha aumentado mais do que 5 %.

Para os materiais utilizados em caldeiras este fenômeno é pouco significativo para temperaturas inferiores a 450 °C.

5.7.2 Fadiga

A fadiga é um fenômeno que ocorre sempre que tensões cíclicas são aplicadas a um material. Normalmente as tensões mais significativas são as de tração na superfície do material. O fenômeno não ocorre em tensões de compressão.

Os processos de fadiga em temperaturas baixas são mais usuais em locais onde haja concentração de tensão na superfície como, por exemplo, locais com alteração de forma geométrica ou quando existem pequenas trincas ou defeitos superficiais.

A propagação da trinca de fadiga ocorre com a aplicação de ciclos de carregamento e depende diretamente do nível das tensões e da quantidade de ciclos.

As fraturas de fadiga partem da superfície e normalmente apresentam estrias que são denominadas marcas de praia.

Este tipo de fenômeno pode ser encontrado em partes estruturais submetidas a oscilação ou vibração.

5.7.3 Fadiga Térmica

Este fenômeno ocorre em partes da caldeira submetidas a variações cíclicas de temperatura quando a tensão decorrente de variações de temperatura se aproxima do limite de escoamento.

Os coletores de vapor superaquecido e do economizador são regiões onde podem ocorrer grandes variações de temperatura. Regiões onde ocorrem choque térmico devem ser inspecionadas com maior cuidado.

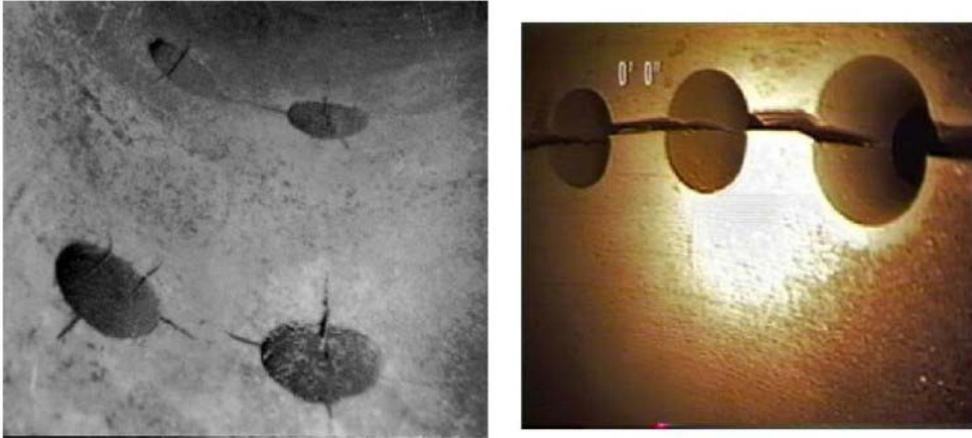


Figura 24 - Exemplo de trincamento em coletor de vapor (videoscopia).

5.7.4 Explosão

A explosão de caldeiras pode ocorrer de duas formas distintas. Explosão do lado da água/vapor e explosão do lado gases quentes combustível.

A explosão do lado água/vapor é mais frequente em caldeiras flamotubulares. Ocorre geralmente por perda do nível de água seguido de superaquecimento e aumento de pressão ou por corrosão interna/fragilização do corpo ou soldas de ligação. Em caldeiras aquatubulares esta ocorrência é rara e pode ocorrer por falhas no tubulão de vapor.

A explosão pelo lado dos gases de combustão/combustível podem ocorrer tanto nas caldeiras aquatubulares como nas flamotubulares. Esta explosão geralmente ocorre em função de falhas momentâneas nos queimadores com conseqüente acúmulo de combustível seguido de vaporização na fornalha.



Figura 25 - Exemplo de explosão de câmara de combustão de caldeira.



Figura 26 - Exemplo de explosão de caldeira pelo lado vapor.

6 FREQUÊNCIA E PROGRAMAÇÃO DE INSPEÇÃO

6.1 Obrigações Legais

A NR-13 Norma Regulamentadora de Caldeiras, Vasos de Pressão, Tubulações e Tanques Metálicos de Armazenamento prescreve que todas as caldeiras devem ser submetidas à inspeção geral, nos seguintes casos:

- ✓ antes de entrarem em operação, quando novas;
- ✓ depois de reforma, modificações, conserto importante ou após terem sofrido qualquer acidente;
- ✓ periodicamente, em função do tipo de caldeira, conforme NR-13, quando estiverem em serviço;
- ✓ após intervalo de inatividade de seis meses ou mais.

6.2 Princípios e Orientações Gerais para a Inspeção

- ✓ Deve ser elaborado e mantido pelo proprietário da caldeira um programa de inspeção documentado, detalhado e individual para cada caldeira, levando-se em conta diferenças de concepção, idade, condições de operação e outras particularidades. Este programa deve ser continuamente revisado e atualizado, levando em consideração novas observações e experiências. Prioritariamente o programa deve observar a conformidade aos requisitos legais.
- ✓ Registros históricos de cada inspeção devem ser mantidos documentados para futura referência. Estes registros devem ser indelévels e rastreáveis.
- ✓ As inspeções devem ser executadas por profissional qualificado e habilitado, podendo ser pessoal próprio ou contratado.
- ✓ Por ocasião das inspeções, quaisquer anomalias já conhecidas pelo proprietário da caldeira devem ser reportadas ao profissional responsável para os trabalhos.
- ✓ Todas as especificações, critérios e padrões gerais de aceitação que possam vir a ser necessários (p. ex. descrição dos materiais, espessura mínima de tubos, valores de ajuste de válvulas de segurança, parâmetros do teste hidrostático, etc.), devem estar prontamente disponíveis nestas ocasiões, evitando dúvidas e equívocos.

- ✓ As inspeções devem ser constituídas de exame interno, exame externo e testes complementares. Cada uma destas etapas é descrita neste guia de forma resumida, como orientação apenas. Cabe ao profissional responsável utilizar sua experiência e conhecimento para determinar a extensão, abrangência e detalhamento das verificações e ensaios a serem aplicados. É necessário que sejam gerados relatórios escritos conclusivos sobre os exames realizados e recomendações deles resultantes.
- ✓ O profissional responsável deverá certificar-se de que todos os reparos e modificações advindas das inspeções sejam executados em conformidade com as normas e códigos de projeto e construção da caldeira, conforme estabelecido pela legislação vigente. Exceção a este requisito é aceitável em tratando-se de novas tecnologias, já consagradas e ainda não previstas à época do código utilizado no projeto e construção da caldeira.

7 PREPARATIVOS PARA INSPEÇÃO DE CALDEIRAS

7.1 Normas de Segurança

Antes de entrar na caldeira, deverão ser observadas todas as medidas necessárias à segurança do pessoal que tiver de trabalhar em seu interior. As medidas estabelecidas pela NR-33 (Norma Regulamentadora para trabalho em espaços confinados) são obrigatórias e devem ser rigorosamente obedecidas, não se admitindo exceções.

Adicionalmente, cada empresa tem suas próprias exigências de segurança que deverão ser seguidas. A seguir listamos algumas ações que deverão ser previamente verificadas:

- ✓ após o completo esvaziamento da caldeira, todas as tubulações a ela conectadas (linhas de vapor, linha de água de alimentação, dos sopradores de fuligem, de descarga, de combustível, etc.) devem ser bloqueadas com flange cego;
- ✓ se duas ou mais caldeiras estiverem ligadas à mesma chaminé, o duto de saída de gases deverá ser completamente bloqueado a fim de evitar o retorno de gases provenientes da outra caldeira;

- ✓ a temperatura interna deverá estar arrefecida até um nível que seja perfeitamente suportável pelo homem conforme NR-15 (Trabalho em Ambientes Insalubres) - índices de bulbo úmido e bulbo seco;
- ✓ deverão ser providas ventilação e iluminação adequada aos trabalhos que serão executados;
- ✓ a disponibilidade de Equipamentos de Proteção Individual (EPI), tais como: roupa apropriada, óculos de segurança, capacete, etc.

7.2 Condicionamento da Caldeira para Inspeção

Para que seja possível realizar uma inspeção geral de uma caldeira é necessária uma preparação que consiste em seu resfriamento, abertura de todas as portas de acesso, inclusive tubulões, limpeza interna e externa para remoção de depósitos, cinzas e incrustações, a fim de que se possa observar minuciosamente o estado das superfícies metálicas, do refratário e demais componentes.

É importante, porém, que o inspetor examine o interior da caldeira antes da remoção dos depósitos, porque sua forma e sua composição muito podem dizer das condições de operação bem como de deterioração, levando a medidas preventivas. Em determinadas ocasiões é interessante colher amostras dos depósitos para análise química.

Durante a operação de lavagem externa dos tubos de caldeiras aquatubulares deverá ser dispensado cuidado especial para evitar que o refratário seja excessivamente molhado. Caso isso ocorra é necessária uma secagem cautelosa quando da entrada em operação, o que se consegue com aquecimento lento do equipamento.

Periodicamente pode ser necessário executar limpeza química da caldeira das superfícies que ficam em contato com a água e vapor e com os gases de combustão. Quando a limpeza for externa aos tubos de caldeiras aquatubulares, cuidados especiais devem ser tomados para não haver retenção das soluções ou, havendo impossibilidade de removê-las completamente, deve-se procurar neutralizá-las. As soluções decorrentes desta limpeza podem ser extremamente corrosivas e podem provocar corrosão das partes metálicas da caldeira. A neutralização pode ser feita com barrilha a 10 % e 60 °C.

No caso de limpeza química das superfícies em contato com água ou vapor já existem sistemáticas minuciosas de procedimento e que, inclusive, afastam a possibilidade de retenção de soluções agressivas. É interessante, contudo, acompanhar estas limpezas com cupons de corrosão, para controlar a natureza e intensidade do desgaste inevitável nestas operações.

As limpezas químicas destas superfícies devem ser executadas após intervalos de tempo prolongados de operação ou sempre que seja constatado deposição excessiva interna ou comprometimento da camada de magnetita. Não é recomendável que este procedimento seja utilizado a cada parada da caldeira.

A limpeza mecânica e preparação das superfícies para inspeção e ensaios deve ser feita pelos meios adequados e com máximo cuidado, a fim de se evitar a abrasão excessiva dos tubos e conseqüentes perdas de espessura. O jato de areia está proibido, devendo-se utilizar de jato d'água (hidrojato de alta pressão).

É recomendável, especialmente se houver qualquer suspeita de vazamento na caldeira, a execução de um teste de estanqueidade na mesma (com não mais que a pressão de operação) no início da parada, antecedendo as inspeções propriamente ditas. Esta providência permite evidenciar os possíveis vazamentos em tempo hábil para sua correção, evitando a sua constatação apenas no teste hidrostático final.

8 INSTRUMENTOS E FERRAMENTAS PARA INSPEÇÃO

Os instrumentos e ferramentas necessárias à execução dos trabalhos de inspeção de caldeiras são os seguintes:

8.1 Instrumental de Rotina

- ✓ espelho de cabo flexível;
- ✓ calibres mecânicos internos e externos;
- ✓ martelos de bola e picador;
- ✓ lupa;
- ✓ imã;
- ✓ micrômetros de inspetor ("*inspector's gage*") e de profundidade;
- ✓ paquímetro.

8.2 Instrumental Especial

- ✓ telelupa (endoscópio);
- ✓ detector de falhas pelo espectro magnético;
- ✓ aparelhos para radiografias;

- ✓ aparelhos para determinação de espessura por meio de raios gama (gamametria);
- ✓ aparelho ultrassônico para determinação de espessura e ou falhas;
- ✓ pirômetros de contato ou infravermelhos;
- ✓ detector de vazamentos por ultrassom;
- ✓ ensaios pela exsudação de líquidos penetrantes;
- ✓ teodolito;
- ✓ lápis de fusão;
- ✓ medidores portáteis de dureza;
- ✓ medidores de películas de incrustação;
- ✓ yoke e partículas magnéticas;
- ✓ IRIS (Internal Rotary Inspection System).

8.3 Equipamentos Auxiliares

- ✓ máquina fotográfica;
- ✓ lanternas;
- ✓ escovas de aço;
- ✓ raspadores;
- ✓ estiletes;
- ✓ sacos plásticos para coleta de amostras;
- ✓ papel de tornassol;
- ✓ trena.

9 INSPEÇÃO DE CALDEIRAS

Distinguem-se duas modalidades de inspeção de caldeiras. A Inspeção Externa e a Inspeção Geral:

9.1 Inspeção Externa

É aquela que pode ser executada a qualquer tempo, com a caldeira em operação. Abrange os seguintes componentes:

9.1.1 Escadas, Plataformas e Passadiços

Estes componentes são inspecionados em geral apenas visualmente, procurando o inspetor observar corrosão ou avarias mecânicas que

comprometam a estrutura ou que necessitem de reparos. Para o caso de plataformas o profissional deve atentar para regiões onde pode ocorrer acúmulo de água de chuva e solicitar a execução de furo para drenagem.

9.1.2 Fundações

As fundações também são inspecionadas visualmente, sendo a avaria mais grave o seu recalque, principalmente se for diferencial quando poderá trazer sérios danos à caldeira provocando vazamento, avarias mecânicas e outras que poderão inutilizá-la por completo.

Há várias maneiras de se identificar um recalque e de medir a sua extensão. Os indícios são geralmente trincas no concreto da estrutura ou do piso, lascamento do revestimento, desalinhamento de tubulação conectada, etc. A maneira mais eficiente de medir e controlar o recalque é por meio de referências, uma externamente num ponto fixo e outra num ponto de estrutura em que se suspeita de recalque, fazendo-se a medição com teodolito.

Deve-se ficar atento para os drenos (de chaminé, por exemplo) pelos quais há possibilidades de escoamento de ácido sulfúrico, formado no encontro dos gases de combustão com umidade atmosférica ou outra forma qualquer de condensado; esta solução ácida poderá penetrar no concreto e corroer severamente as ferragens da armadura e os parafusos chumbadores.

9.1.3 Suportes Externos, Chaparia e Isolamento

Os perfis da estrutura de sustentação (pilares, vigas, etc.) e a chaparia devem ser inspecionados visualmente. Estes estão sujeitos à corrosão e avarias mecânicas, tais como, flambagem nos pilares quando excessivamente carregados, parafusos frouxos, pintura avariada e conseqüente corrosão localizada, além de corrosão sob contato e de outros tipos.

A pintura deve ser cuidadosa e regularmente inspecionada, pois sinais de tinta queimada são bons indícios de problemas com refratários. Neste caso deve-se acompanhar a evolução da temperatura, no local e vizinhanças, para perfeita avaliação da situação do problema.

Várias causas concorrem para degradação do isolamento externo de uma caldeira: vazamentos, infiltração de águas e gases, má aplicação, má qualidade de material, etc. O essencial é providenciar reparos, imediatos se possível, sempre que surgirem trincas e desagregação.

9.1.4 Vazamentos

Por ocasião da Inspeção Externa devem ser observados e anotados, os vazamentos de água, vapor e gases que servirão como subsídios para inspeção geral da caldeira.

Uma fonte de vazamentos que deve ser observada atentamente são as válvulas de segurança.

9.1.5 Câmara de Combustão (Fornalha)

As condições internas da câmara de combustão devem ser observadas nas inspeções externas, através dos visores, quanto à direção (se há incidência nos tubos), coloração e estabilidade das chamas, desgaste dos refratários e abaulamentos dos tubos. As informações assim colhidas muito ajudarão futuramente, por ocasião da inspeção geral.

9.2 Inspeção Geral

A inspeção geral inclui a inspeção externa, conforme exposto nos itens precedentes, e mais a inspeção de todos os demais componentes. Só poderá ser executada com a caldeira fora de operação.

9.2.1 Tubulão e seus Dispositivos Internos

Todas as superfícies internas, dispositivos internos de separação de líquido e vapor, conexões especialmente as dos visores de nível e das válvulas de segurança, devem ser cuidadosamente examinadas para se verificar a existência de corrosão, avaria mecânica ou deposição de matéria estranha.

As juntas soldadas, bem como as áreas adjacentes deverão ser examinadas procurando-se observar se há corrosão localizada, trincas e rebites frouxos, o que pode ser verificado pelo teste do martelo. A corrosão nestas zonas é mais perigosa que aquela encontrada em pontos afastados das juntas. Os locais em que a circulação de água é deficiente estão sujeitos a um ataque localizado mais intenso.

Em tubulões rebitados é oportuno o exame, por amostragem, dos rebites e zonas adjacentes com líquidos penetrantes (teste de exsudação) para pesquisa de trincas. As espessuras da parede do tubulão devem ser sempre medidas e registradas, para se definir a taxa de corrosão.

O melhor processo para isso consiste no uso de aparelhos de medição por ultrassom.

As juntas soldadas dos tubulões devem ser inspecionadas quanto a existência de defeitos superficiais utilizando-se partículas magnéticas ou líquido penetrante.

Por ocasião da inspeção periódica, a qualidade da água de alimentação (incluindo água de alimentação principal, de reposição, e condensados que retornam à caldeira) é aferida. Uma inspeção interna nos balões e coletores torna isto possível. No caso dos coletores, devem ser removidos *caps* para possibilitar esta visualização, e também ser feita a retirada de amostras dos depósitos internos e possíveis detritos, que serão analisadas. Falhas ou deficiências da camada de óxido protetor, depósitos excessivos, corrosão, *pitting*, erosão, e outras irregularidades associáveis à qualidade da água são, portanto, evidenciadas neste exame dos balões e coletores.

9.2.2 Fornalha

Na fornalha os vários itens que deverão ser observados são:

9.2.2.1 Tubos

Os tubos da fornalha deverão ser inspecionados, inicialmente, antes de sua limpeza, a fim de se verificar a existência de incrustação, nas superfícies externas e, em caso afirmativo, pesquisar a natureza da mesma.

Depois de feita a limpeza, procede-se ao exame cuidadoso das superfícies expostas, pesquisando-se, principalmente, corrosão, abaulamentos e zonas de superaquecimento e, sempre que possível, determinando a sua extensão.

A presença de "laranjas" e corrosão alveolar são facilmente identificados fazendo-se incidir o feixe de luz da lanterna tangencialmente ao tubo.

As "laranjas" identificadas deverão ter o seu perímetro medido na zona de maior deformação, fazendo-se o registro com a identificação completa do tubo e respectiva posição a fim de que se possa fazer o controle periódico da evolução dos mesmos.

De um modo geral o valor máximo que se admite para um abaulamento é da ordem de 5 % sobre o diâmetro externo do tubo.

A presença de "laranjas" é uma indicação de incidência de chama ou de presença de depósitos internos aos tubos.

O desgaste interno por corrosão, se uniforme, poderá ser perfeitamente avaliado com medições de espessura por ultrassom ou IRIS.

Os tubos da caldeira devem ser examinados visualmente com foco em corrosão, erosão, abrasão, desalinhamentos, deformações, amassamento, empolamento, inchamento, porosidade, trincas, rupturas, descoloração, alterações da textura do material, etc.

Deve-se verificar os tubos também quanto a danos mecânicos decorrentes de possível interferência física entre componentes da própria caldeira, limpeza da caldeira com instrumentos pontiagudos, colisões com sopradores de fuligem, queda de objetos pesados, etc. Tubos do fundo da fornalha são particularmente sujeitos a danos por queda de grandes formações de cinza, que se desprendem das partes altas da caldeira.

Os pontos mais críticos das fornalhas normalmente são:

- ✓ Próximo aos queimadores: tubos laterais e superiores quanto a corrosão, oxidação externa, erosão, deterioração metalúrgica, formação de depósitos internos.
- ✓ Próximo aos sopradores de fuligem: ocorrência de erosão, impingimento de condensado proveniente do vapor não devidamente purgado.
- ✓ Fundo da fornalha: em caldeiras altas, normalmente sofre erosão externa devido ao impacto com a queda de cinzas da fornalha.

9.2.2.2 Refratário

O refratário da fornalha deverá ser examinado visualmente quanto a rachaduras, avarias mecânicas, vitrificação ou escorificação e decomposição por ação química; esta deterioração pode ser facilmente identificada pela perda de consistência do material, por meio de penetração de estilete.

9.2.2.3 Queimadores

Os queimadores deverão ser removidos e completamente desmontados para limpeza e inspeção minuciosa. Atenção especial deverá ser dispensada ao difusor, que, geralmente, fica sujeito a temperaturas muito elevadas. Quando se trata de queimador de óleo, o bico deverá ser examinado cautelosamente, pois os furos são geralmente atacados por erosão.



Figura 27 - Deterioração em queimador de óleo.

9.2.3 Superaquecedor

O superaquecedor deverá ser examinado visualmente tanto quanto à corrosão e abaulamento e quanto à possível erosão causada pelos sopradores de fuligem. Também existe possibilidade de ocorrência de oxidação e fluência devido à alta temperatura nestas regiões.

É recomendável além da inspeção visual fazer medição de espessura, de diâmetros e efetuar réplicas metalográficas para detecção de fases metalúrgicas indesejáveis.

Inspeccionar também a suportação da serpentina e os coletores.

9.2.4 Economizador

O economizador está sujeito à corrosão devido a baixa temperatura dos gases que por ele passam. Também está sujeito à erosão quando ocorre vazamento com jato de condensado de alta pressão incidindo sobre os seus tubos.

Os locais mais sujeitos à corrosão são as adjacências dos suportes dos tubos e das soldas e zona de abrangência dos sopradores de fuligem. A medição de espessura dos tubos é o melhor meio de se identificar os que

não estão em condições de operação segura. Para os tubos localizados no interior das serpentinas a inspeção torna-se extremamente difícil e quando surgir o problema, este deverá ser estudado à parte.

Inspeccionar visualmente as regiões onde houver possibilidade de acesso. Inspeccionar visualmente tubos externamente e suportação. Verificar condição de limpeza do feixe tubular.

Em caldeiras a carvão é comum a ocorrência de erosão devido à passagem dos gases com as cinzas em velocidade mais elevada sobre os bancos de serpentinas. Nestes casos deve ser feito uma inspeção mais detalhada e cuidadosa.

9.2.5 Preaquecedor de Ar Tubular

Em virtude da baixa temperatura dos gases que passam nesta seção, ainda mais baixa que no economizador, a possibilidade de ataque nos tubos é muito maior. Verifica-se que este ataque é mais intenso nas proximidades da entrada de ar frio.

Com o fim de eliminar ou diminuir este ataque, as caldeiras mais modernas dispõem de meio pelo qual o ar sofre um aquecimento inicial, antes de chegar ao preaquecedor. A experiência tem mostrado que tal sistema é bastante eficiente. Normalmente, para isso, usa-se o equipamento conhecido como preaquecedor a vapor.

Inspeccionar visualmente as regiões acessíveis. Verificar possíveis deformações, corrosão e existência de depósitos. Verificar o pH dos depósitos e solicitar neutralização caso necessário.

9.2.6 Preaquecedor a Vapor

Existem vários tipos e os processos de deterioração mais frequentes costumam ser afrouxamento da mandrilagem ou defeitos na solda dos tubos com os coletores, com conseqüente vazamento.

Inspecciona-se da mesma maneira que o preaquecedor de ar.

9.2.7 Preaquecedor de Ar do Tipo Regenerativo

São aquecedores compostos por conjuntos de favos de chapas de pequena espessura (1 mm, de aço patinável - resistência à corrosão) formando um rotor. Este fica instalado de maneira que o duto de ar e o duto de gás estão alinhados em sentidos opostos e a troca de calor é feita à medida que estes favos giram. Normalmente o lado

frio sofre corrosão severa após alguns anos de uso. Especial cuidado deve ser tomado, pois às vezes algumas partes se soltam causando a interrupção da rotação do equipamento.

Cuidados especiais devem ser tomados durante a liberação para inspeção deste equipamento. O acúmulo de depósitos internos pode provocar incêndios inesperados.



Figura 28 - Deterioração da chaparia de preaquecedor rotativo.

9.2.8 Dispositivos Auxiliares

9.2.8.1 Válvulas de Segurança

Os detalhes de inspeção das válvulas de segurança estão abordados em outro guia desta série. Entretanto, pelo menos uma vez por ano deverão ser removidas, desmontadas, inspecionadas e reparados os defeitos, quando existentes, e recalibradas conforme prevê a NR-13, em função das diferentes categorias de caldeiras.

Válvulas de segurança são dispositivos de proteção sujeitos a falhas latentes, isto é, falhas que só serão percebidas quando a atuação da válvula se fizer necessária. Assim, mesmo assumindo-se que tenham recebido adequada manutenção, e sejam suficientes em termos de vazão, as válvulas de segurança devem ainda ser testadas anualmente, com foco na calibração e funcionamento adequado. A

pressão de abertura e o diferencial de alívio devem estar em estrita conformidade com as especificações do fabricante, com o código de projeto da caldeira e com a legislação vigente.

A abertura das válvulas de segurança de caldeiras deve ser em disparo único, em "pop", sem apresentar batimento ou trepidação. As PSV devem também estar isentas de vazamentos perceptíveis quando da operação normal da caldeira.

Nota: o teste das válvulas de segurança, bem como sua desmontagem e revisão periódicas são mandatórios pela legislação vigente. No caso da remoção da válvula de segurança para calibração em bancada de teste deverá ser feita inspeção visual completa de todos os componentes e registrar nos relatórios as condições encontradas. É recomendável a execução de ensaio de Líquido Penetrante pelo menos no bocal, porém o ensaio pode ser feito em todo o corpo da válvula, principalmente às que operam acima de 400 °C.

Recomendações gerais para teste de válvulas de segurança instaladas na caldeira:

- ✓ Iniciar o teste pela PSV cuja pressão de ajuste é mais alta.
- ✓ A cada válvula testada, as demais deverão estar travadas.
- ✓ Caso sejam requeridos ajustes, disparar a válvula em questão no máximo 5 vezes seguidas. Ocorrendo esta situação, somente após 6 horas poderá ser feita nova tentativa.
- ✓ Quando uma PSV abrir, o operador deverá apagar um queimador e liberar vapor pela válvula de alívio *blowoff*.
- ✓ Utilizar manômetro-padrão aferido, instalado no balão de vapor para as válvulas do balão, e no coletor ou na linha de vapor principal, para a válvula do superaquecedor.
- ✓ Uma tolerância de ± 1 kgf/cm² no valor de abertura da PSV, é usualmente aceita. O código ASME Seção I estabelece valores para cada faixa de pressão de PSV.
- ✓ Testes de acumulação devem ser executados com muito cuidado em caldeiras providas de superaquecedores.

Opcionalmente ao teste de válvulas de segurança instaladas na caldeira, podem ser utilizados dispositivos atuadores hidráulicos, geralmente associados a uma instrumentação especial, constituindo o chamado teste *on-line*, sem a necessidade do disparo em "pop" e abertura total das válvulas de segurança.

Nota: Os testes de válvulas de segurança instaladas na caldeira e os testes "On-Line" devem ser utilizados apenas para verificação do Set de Abertura das PSV. Estes testes não substituem a desmontagem e calibração em bancada de PSV.

9.2.8.2 Sopradores de Fuligem

Os sopradores de fuligem ficam submetidos a temperaturas elevadas e sujeitos à corrosão por alta temperatura, sendo comum aparecerem trincas e erosões nos furos. Estas falhas deverão ser corrigidas a fim de evitar-se que o jato de vapor incida sobre os tubos, causando erosão.

Deve-se verificar também o seu alinhamento e o dispositivo de rotação. Em alguns casos tem sido observado aparecimento de fase sigma nos sopradores com consequente rompimento.

Quando o soprador for longo (acima de 3 m) considerar a deformação que sofre à medida que é inserido. O projeto destes equipamentos prevê que ocorra uma certa deformação, mas quando for excessiva poderá haver interferência com os tubos da caldeira que estiverem próximos ou mesmo a projeção de vapor sobre os tubos ocorrendo o travamento/deformação do soprador ou erosão excessiva dos tubos. Recomenda-se que nas paradas estes equipamentos sejam inseridos a frio (sem injeção de vapor obviamente) e observado o seu comportamento pelos inspetores. Se houver alguma anomalia verificar a possibilidade de desempenho do tubo central.

Os sopradores deverão ser inspecionados visualmente quanto à deformação, corrosão e trincas. A inspeção pode ser complementada por aplicação de Ensaios Não Destrutivos.

9.2.8.3 Chaminé

É usual que as chaminés de caldeira possuam revestimentos internos refratários/isolantes, de maneira a garantir que os gases não percam temperatura garantindo a tiragem adequada.

Em caldeiras que operam continuamente os danos internos são mais lentos, mesmo em caldeiras que utilizam carvão como combustível. Cuidados devem ser tomados para caldeiras que usualmente hibernam, pois há dificuldades de manter-se a temperatura adequada do ar circulante no interior da chaminé. Quando estes equipamentos

forem metálicos, os produtos de combustão que ficam aderidos às paredes internas, ao reagir com a umidade poderão formar compostos ácidos que deterioram os revestimentos e acabarão comprometendo a chaparia da chaminé.

Também deve-se cuidar da superfície externa, pois a exposição a atmosferas industriais aceleram a corrosão rapidamente tão logo a pintura tenha sofrido deterioração. Inspeccionar atentamente a pintura externa da chaminé, escadas e plataformas.

Em chaminés com junções aparafusadas deve-se verificar os parafusos, pois estão sujeitos a processo de fadiga, em função das oscilações usuais neste tipo de estrutura. Recomenda-se uma inspeção visual e com martelo a cada dez anos de funcionamento.

Em chaminés do tipo estaiada é interessante verificar o prumo e a tensão nos cabos de estaiamento.

9.2.8.4 Dutos de Ar e de Gases

A chaparia dos dutos de ar e de gases deve ser inspecionada visualmente interna e externamente. Dutos isolados deverão ser inspecionados externamente segundo um intervalo maior, sendo esta inspeção feita em pontos convenientemente escolhidos, usando-se nestes um trecho de isolamento removível.

As lâminas das válvulas borboletas, geralmente utilizadas para bloqueios em dutos de chaminés deverão ser examinadas quanto à corrosão, afrouxamento, empenamento e operabilidade.

9.2.9 Tubulações

Recomenda-se consultar o Guia de Inspeção específico para tubulações para mais detalhes.

9.2.9.1 Linha de água de alimentação

Estão sujeitas à perda de espessura causada por *corrosão acelerada por fluxo*, podendo resultar em rupturas de consequências catastróficas. Toda a tubulação deve ser inspecionada com este foco, dando-se atenção especial às curvas, partes adjacentes ou à jusante de válvulas, derivações, pontos de dosagem de químicos ou onde quer que a geometria da linha favoreça o aumento de turbulência e o impingimento do fluido contra as paredes dos tubos.

A medição ultrassônica de espessura é a técnica mais indicada. Como este tipo de corrosão pode ocorrer de forma localizada, é importante que se meça, a intervalos criteriosamente definidos, ao redor de toda a circunferência do tubo, e que seja feito um *grid* adequado de pontos de medição nas áreas suspeitas. Se necessário, inspecionar internamente com um endoscópio. A aparência rugosa típica da superfície interna das regiões corroídas será facilmente identificada com este instrumento.

9.2.9.2 Linha de vapor principal

Estão sujeitas principalmente à acumulação de danos de longo prazo (fluência), mas ainda assim devem receber certa atenção também nas inspeções periódicas.

Nestas ocasiões, devem ser verificadas principalmente as condições gerais da suportação (estado visual e funcionamento dos suportes elásticos, exame por END nos olhais e outros dispositivos de suspensão soldados   tubula o).

Estas tubula es possuem alta energia, portanto uma ruptura pode produzir danos catastróficos nas adjacências. A proximidade da sala de controle, abrigo de operadores e passagem de profissionais poderão agravar ainda mais esta situa o.

Os regimes transientes das caldeiras, paradas e partidas, situa es de emergência, podem causar cargas dinâmicas (golpe de arinete e até martelo) que produzem sérios danos em toda a suporta o. Assim   fundamental que as tubula es tenham sempre acompanhamento em partidas e paradas, e periodicamente, de maneira a manter o sistema íntegro.

De modo particular em caldeiras onde parte da linha de vapor esteja sujeita a intempéries, aten o deve ser dada   possibilidade de corrosão externa sob o isolamento térmico da tubula o, principalmente às que operam abaixo de 120  C ou em regime intermitente.

10 RESUMO DE DETERIORAÇÕES E AVARIAS EM CALDEIRAS E ENSAIOS

A seguir apresentamos um resumo dos tipos de deterioração mais frequentes que ocorrem nas diferentes partes de uma caldeira:

Tabela 1 - Resumo dos danos associados aos componentes típicos de uma caldeira

Local de Ocorrência	Corrosão	Fadiga	Erosão	Oxidação Térmica	Fluência	Degradação Microestrutural
Fornalha	■ →	■ →	■ →			
Tubulões	■ →	■ →				
Feixe Tubular (economizador)	■ →	■ →	■ →			
Superaquecedores	■ →	■ →	■ →	■ →	■ →	■ →
Coletores de alta temperatura		■ →		■ →	■ →	■ →
Dutos de gases	■ →		■ →			
Linha de vapor vivo		■ →			■ →	■ →
Elementos estruturais	■ →	■ →				
Desaerador	■ →	■ →				
Queimadores	■ →		■ →	■ →		

11 TESTE HIDROSTÁTICO

Quando da construção da caldeira esta é submetida a uma prova de pressão hidrostática de acordo com a norma segundo a qual foi construída. Caldeiras em uso, quando reparadas em qualquer ponto dos componentes sujeitos à pressão, deverão ser submetidas a novo teste hidrostático.

Normalmente a pressão de ensaio deverá ser igual a 1,5 vezes a PMTA. (pressão máxima de trabalho admissível). Para geradores que operam com pressão superior a 40 kgf/cm² admite-se para teste uma pressão mínima de 1,2 vezes a PMTA. Durante a realização deste teste só deverão permanecer nas imediações do equipamento aquelas pessoas estritamente necessárias à sua execução.

A aplicação de prova de pressão hidrostática (com valor normalizado de sobrepessão, e seguindo procedimentos de teste também padronizados pelo código de projeto da caldeira) permite verificar a existência de vazamentos ou deficiências de resistência mecânica dos componentes da caldeira.

O valor de sobrepressão estabelecido nos códigos de projeto referem-se a caldeira nova e não corroída, não sendo normalmente utilizado nos testes periódicos subsequentes.

O teste deverá ser feito com água tratada ou desmineralizada em temperatura entre 20 °C e 40 °C, tendo-se o cuidado de eliminar todas as bolsas de ar são formadas durante o enchimento através dos ventos. A pressão de teste deverá ser mantida por pelo menos 30 minutos.

Quando ocorrer queda da pressão manométrica durante o TH e não se conseguir localizar visualmente o local do vazamento pode-se utilizar um detector ultrassônico para uma localização aproximada.

A pressurização e despressurização da caldeira deve ser feita de forma lenta e gradual com patamares onde a pressão é mantida por um determinado tempo. Este processo permite acomodação dos diferentes componentes da caldeira e uma inspeção mais segura. A tabela 2 e a figura 29 apresentam um exemplo de curva de pressurização de caldeira:

Tabela 2 - Exemplo de curva de pressurização de caldeira

Segmento da Curva	Operação/Atividade	Razão de Pressurização ou Despressurização
A	Pressurização até a PMTA	2 a 3 kgf/cm ² por minuto. Pode ser conduzida em patamares intermediários
B	Elevação até a pressão de teste, P _{TH}	1 kgf/cm ² por minuto
C	Estabilização na pressão de teste por 30 minutos	Zero
D	Redução da pressão até a PMTA	2 a 3 kgf/cm ² por minuto
E	Ingresso dos interessados na caldeira e execução das inspeções	Zero
F	Despressurização	2 a 3 kgf/cm ² por minuto

Recomendações gerais para teste hidrostático:

- Travar as válvulas de segurança.
- Pressurizar por meio das bombas de alimentação (Bufês).
- Utilizar água desmineralizada, fria (20 a 40 °C).
- Utilizar manômetro-padrão aferido, instalado no tubulão de vapor.
- Inspeccionar todas as partes pressurizadas acessíveis da caldeira.
- Surgimento de gotículas em tubos mandrilados não deve motivar reprovação.

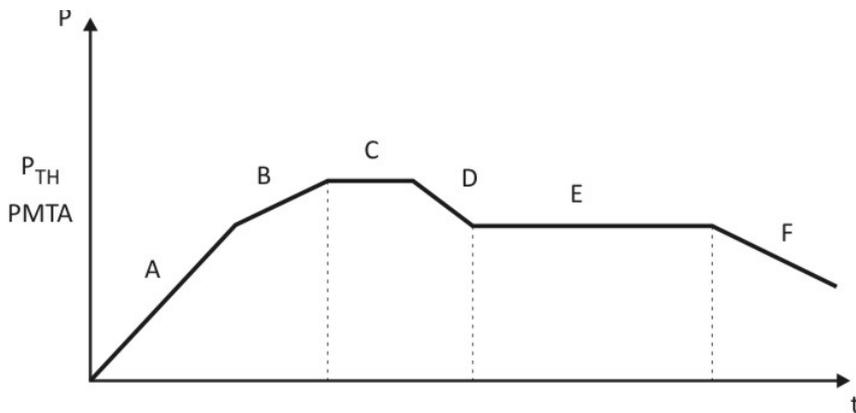


Figura 29 - Exemplo de curva de pressurização de caldeira.

Antes da caldeira entrar em operação após as paradas para inspeção é comum aplicar-se um teste para a simples observação da estanqueidade das bocas de visita e das conexões que foram abertas. Neste caso a pressão aplicada deve ser aproximadamente a pressão normal de operação, observando-se para a água os limites de temperatura já mencionados.

12 CUPONS DE TESTE

Cupons de teste podem ser instalados em vários locais da caldeira com objetivo de avaliar a corrosão e incrustação provocadas pela água ou vapor permitindo avaliar como está o desempenho do tratamento de água da caldeira. Usualmente analisa-se a perda de massa e o aspecto visual após um determinado número de horas de exposição. Podem também ser utilizadas sondas corrosimétricas.

A utilização de cupons também é usual para a avaliação do tratamento químico da caldeira.

13 MEDIÇÕES DE ESPESSURA

Medições periódicas de espessura com ultrassom são essenciais para controlar a vida útil dos tubos, detectar desgastes anormais e confirmar a Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) dos componentes da caldeira.

A utilização de planos para prospecção das medidas por ultrassom sistematiza e simplifica estas atividades. Abaixo são recomendadas linhas gerais para elaboração de um plano de prospecção ultrassônica para medição de espessura:

Ressalta-se que o plano deve ser individualizado para cada caldeira, levando-se em conta sua concepção, idade, histórico de corrosão, etc. As medições de espessura devem ser sempre complementadas com uma cuidadosa inspeção visual quanto a perdas de material dos tubos, por exemplo, com o uso de uma lanterna em ângulo. As medições são feitas em um arranjo lógico de localizações (p. ex. a cada 6 metros, de 5 em 5 tubos), resultando em uma densidade de medições adequada a cada caso, e para cada parte da caldeira.

Vários milhares de pontos podem ser necessários em uma inspeção, para proporcionar uma adequada avaliação dos componentes da caldeira. O arranjo de medições também deve ser tal que permita boa repetibilidade dos ensaios em inspeções subseqüentes.

Tipicamente as medições de espessura são feitas a cada inspeção interna da caldeira. Estes períodos, bem como a densidade de pontos, podem ser ajustados dependendo dos resultados. Abaixo são recomendadas práticas para prospecção de cada parte da caldeira.

- ✓ Os tubos de fornalha são medidos entre 3 e 6 níveis ou elevações, dependendo do tipo de proteção contra corrosão existente. Prioritariamente são medidos os níveis de ar de combustão e queimadores, e os tubos curvados ao redor das diversas aberturas da fornalha. Em áreas críticas é recomendado que a medição seja feita em três pontos da semicircunferência do tubo exposta aos gases, ao invés de uma única medição central. Partes como o nariz, que sabidamente experimentam maior desgaste, também devem receber atenção especial nas medições. As regiões altas da fornalha e teto, em contrapartida, geralmente apresentam baixas taxas de corrosão e podem ser examinadas com menor frequência ou com um nível menor de pontos.
- ✓ Os tubos de superaquecedores são medidos prioritariamente em partes curvas e nos trechos retos, na linha de centro dos sopradores de fuligem.
- ✓ Os tubos de economizadores devem ser medidos com prioridade nas partes inferiores, mais frias, e nas linhas de sopragem.

14 REPARO DE CALDEIRAS

Os tipos de reparo aplicáveis em caldeiras dependem do código de construção e montagem da caldeira, da natureza do reparo a ser feito, das condições locais e da experiência do profissional responsável. Caso necessário o fabricante da caldeira deverá ser consultado. Não faz parte do escopo desta guia detalhar os reparos que devem ser feitos em caldeiras.

Conforme já mencionado no parágrafo anterior, após qualquer reparo que afete a estrutura dos componentes sujeitos a pressão, a caldeira deverá ser submetida a um ensaio de pressão hidrostática de acordo com o respectivo código de construção.

Os reparos e modificações devem ser precedidos da elaboração de Projeto de Alteração ou Projeto de Reparo conforme estabelecido pela NR-13.

O inspetor deve, ao final do relatório de inspeção, acrescentar uma previsão de serviços e reparos necessários para a próxima parada da caldeira. Esta lista normalmente é debatida com o pessoal de operação e produção e encaminhada para providência dos órgãos de manutenção na forma de documento conhecido como Recomendação de Inspeção.

Algumas atividades são complexas podendo demandar muito tempo de preparação e planejamento, inclusive tempo para aquisição de materiais e componentes necessários aos eventuais reparos e modificações.

15 REGISTROS E RELATÓRIOS

Para cada caldeira deverá ser mantido um prontuário, do qual deverão constar todos os assentamentos referentes à mesma, desde seu projeto e montagem, incluindo os certificados de fabricação, ensaios, análises, etc.

O resultado das inspeções deverão ser transcritos para relatórios indelévels e rastreáveis. que deverão conter todos os itens estabelecidos pela Norma Regulamentadora 13.

Toda caldeira deverá possuir um Registro de Segurança, conforme NR-13. O registro deverá conter anotações de situações anômalas de operação pela qual passou o equipamento assinadas pelo operador da caldeira.

Também deve conter as datas de intervenções de inspeção e condição operacional da caldeira assinadas pelo PH e Operador da caldeira.

Em formulário à parte deverá ser mantido controle das medidas de espessura, tanto para os tubos como para os tubulões, calculando-se, para cada série de medidas, as consequentes taxas de corrosão e a vida útil.

16 AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE

A vida nominal de projeto das caldeiras varia entre 20 e 30 anos. Esse valor depende do código de construção e montagem e de características específicas de cada caldeira. A experiência prática mostra que a durabilidade das caldeiras geralmente é muito maior que a prevista em projeto, tanto para caldeiras flamotubulares como para caldeiras aquatubulares.

Há registros de caldeiras em operação há mais de 50 anos e alguns que ultrapassaram 100 anos de operação. Estes resultados dependem substancialmente da forma como a caldeira é operada, da qualidade do tratamento de água e da eficiência das inspeções e manutenção.

Para que se obtenha um prolongamento da vida útil, sem comprometer os aspectos de segurança, é necessário que se execute periodicamente uma avaliação cuidadosa e detalhada do histórico operacional e das condições de integridade de cada componente da caldeira, projetando a sua vida remanescente. Muitas vezes alguns reparos e substituições serão necessários para alcançar o resultado desejado.

A NR-13 estabelece que a atividade de Avaliação de Integridade e Cálculo de Vida Remanescente seja executada a partir do 25º ano de operação. Este é um prazo legal que não deve ser ultrapassado, porém recomenda-se que esta atividade seja iniciada quando houver os primeiros indícios de final de vida útil ou quando a caldeira atingir cerca de 80 % da vida prevista no projeto.

Destacamos que alguns fatores poderão reduzir a vida útil estabelecida no projeto. São fatores que normalmente reduzem a vida de projeto:

- ✓ operação com parâmetros acima da capacidade nominal;
- ✓ número de partidas e paradas excessivo;
- ✓ detecção de danos acumulados em inspeções periódicas;
- ✓ tratamento de água fora dos padrões estabelecidos.

As tabelas 3 e 4 apresentam os ensaios não destrutivos mais utilizados na avaliação de integridade de caldeiras aquatubulares e flamotubulares, respectivamente.

Tabela 3 - Uso de Ensaio Não Destrutivos na Avaliação de Integridade de Caldeiras Aquatubulares

Ensaio	Locais Preferenciais	Observação
Líquidos penetrantes	Fornalhas de tubos compostos, elementos estruturais diversos, espaçadores, elementos soldados em geral, soldas heterogêneas	
Partículas Magnéticas	Soldas (topo de derivações) de tubulões e coletores, espelhos em geral, desaerador	Investigação de <i>trincas em uniões e juntas em espelhos</i>
Medição de Espessura	Tubos de troca térmica, coletores, balões, desaerador	
Ultrassom para detecção e dimensionamento de descontinuidade	Soldas de tubulões e coletores, derivações de coletores, secções de espessura elevada	
Metalografia de campo (réplica ou microscópio portátil)	Tubos e coletores de alta temperatura, tubos da fornalha	Investigação de fluência, degradação microestrutural (grafitização, esferoidização, amolecimento, superaquecimentos localizados, pesquisa de descontinuidades previamente encontradas)
Medições dimensionais	Avaliação de alteração do diâmetro de tubos e coletores de alta temperatura (principalmente na zona morta)	Investigação de fluência
Medição de Dureza	Tubos e coletores de alta temperatura	
IRIS	Tubos do banco de convecção e da fornalha-parede d'água	Investigação de formação de depósitos internos, corrosão
Videoscopia	Dessuperaquecedores, economizador, coletores, <i>downcomers</i>	
Exames destrutivos em amostras	Tubos de serpentinas de alta temperatura	
Análise das cargas dos suportes de tubulação	Tubulações de saída da caldeira e entrada em equipamentos - turbina	Comparar os valores obtidos com dados de projeto

Tabela 4 - Ensaios Não Destrutivos Recomendados para Caldeiras Flamotubulares

Componente	US	PM	LP	IV	ME	RE	OBS
Casco			x	x	x		LP em 100 % das soldas
Fornalha			x	x	x		
Espelhos			x	x	x	x	
Tubos				x	x	x	Efetuar TH
Conexões			x	x			De Saída de vapor e PSVs
PSVs				x			Retirar e Calibrar
Queimador				x			
Duto de saída gases				x			
Isolamento e refratário				x			

Nota: US - Ultrassom; PM - Partículas Magnéticas; LP - Líquidos Penetrantes; IV - Inspeção Visual; ME - Medição de Espessura; RE - Réplica metalográfica; TH - Teste Hidrostático.

17 CONSERVAÇÃO DE CALDEIRAS FORA DE OPERAÇÃO

Em determinadas situações será necessário manter a caldeira apagada e desativada por um tempo. É muito perigoso manter caldeiras paradas por muito tempo, pois geralmente apresentam depósitos e resíduos de combustão em seu interior que podem ser altamente corrosivos (geralmente derivados de enxofre e sódio) quando dissolvidos em água ou na umidade ambiente.

Sempre que for necessário manter a caldeira nesta situação recomenda-se que seja adotado um procedimento para “hibernação” da caldeira. Esse procedimento geralmente é fornecido pelo fabricante da caldeira e faz parte do manual da mesma.

Normalmente o procedimento de hibernação passa pela seguinte sequência de ações:

- ✓ Antes de parar a caldeira, queimar combustíveis com baixo enxofre.
- ✓ Isolar instrumentos ou remover instrumentos e dispositivos auxiliares.
- ✓ Raquetear todas as saídas e entradas de água e vapor.
- ✓ Lavar, secar e neutralizar todas as superfícies internas em contato com os gases.

- ✓ Lavar e secar o interior de tubulões e tubos ou manter cheio com um fluido não corrosivo.
- ✓ Fechar tubulões, *vents* e respiros.
- ✓ Manter a caldeira com aquecimento através de resistências, serpentinas e similares.
- ✓ Controlar a umidade relativa no interior da caldeira.



ISBN 978-65-88039-01-4

